

AU APĂRUT:

Nădășan Șt., Horovitz B., Salta V., Bernath A.,
OBOSEALA METALELOR

pag. 244

lei 9,30

Tărăboi V.

ORGANE NOI ÎN CONSTRUCȚIA
DE MAȘINI

316 pag.

lei 13,50

Botez E.

ANGRENAJE

pag. 388

lei 24,60

Lei 10.—

GH. BUZDUGAN

Caleculul de rezistență la solicitări variabile



EDITURA TEHNICĂ

Prof. ing. GH. BUZDUGAN
Membru corespondent al Academiei R. P. R.

Calculul de rezistență la solicitări variabile

Ediția a II-a



EDITURA TEHNICĂ
București — 1963

Lucrarea tratează teoria ciclurilor de solicitări variabile, studiul factorilor care condiționează rezistența la oboseală și metodele de calcul la solicitări variabile.

În această ediție, față de ediția precedentă, se prezintă, în mod critic, metodele actuale de calcul de rezistență la solicitări variabile, practicate în diferite țări, cu recomandări pentru cele mai potrivite. De asemenea se face o prezentare a stadiului actual al teoriilor asupra ruperii prin oboseală și se dau indicații asupra eficienței metodelor de tratamente superficiale pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală.

Lucrarea se adresează inginerilor proiectanți și inginerilor tehnologi din industria constructoare de mașini, precum și cercetătorilor și studenților.

PREFAȚĂ

Prima ediție a acestei cărți a apărut în 1955. La data aceea, la noi în țară, calculul de rezistență la solicitări variabile era privit încă cu rezervă, atât în învățământ, cât și în proiectare.

De atunci știința și tehnica românească au parcurs un drum lung. Astăzi, metoda de calcul la oboseală este predată în cursurile de rezistența materialelor din facultăți și este aplicată curent în proiectare. Laboratoare din învățământ, institute de cercetări și uzine au fost dotate cu mașini pentru încercări la oboseală. S-au publicat studii, s-au ținut conferințe și sesiuni științifice asupra multiplelor aspecte ale problemei. Numeroase metode tehnologice de îmbunătățire a rezistenței la oboseală sunt practicate curent în uzine, asigurând calitatea produselor care trec departe peste granițele țării.

Cu cât industria constructoare de mașini se dezvoltă, cu atât trebuie aprofundat mai mult studiul oboselei materialelor, sub variatele sale aspecte, pentru a mări siguranța de funcționare, pentru a reduce mereu greutatea și prețul produselor. Lucrarea de față, avînd ca scop principal de a prezenta metodele de calcul la solicitări variabile, trebuie, în mod implicit, să enumere diferenții factori care condiționează rezistența la oboseală, precum și metodele tehnologice de îmbunătățire a ei.

În vederea îmbunătățirii calității produselor este necesar ca inginerii proiectanți și tehnologi din uzine să facă experimentări asupra rezistenței pieselor solícitate la oboseală. Încercînd diferite variante constructive sau tehnologice ale aceleiași piese, se va găsi soluția optimă pentru fabricație. Pentru documentarea de

amănunt, se dă o serie de indicații bibliografice cu lucrări ce se găsesc în bibliotecile tehnice.

În afara metodelor de calcul, cunoscute din literatura străină de specialitate, la § 6.4 s-a elaborat o metodă nouă, care prezintă o serie de avantaje față de cele cunoscute. În exemplele de la cap. 7 se arată modul de aplicare a acestei metode.

Cu ocazia întocmirii noii ediții, ne exprimăm dorința ca problemele referitoare la oboseala materialelor să fie cunoscute de orice inginer, proiectant și tehnolog din toate ramurile construcției de mașini și să fie aplicate cu succes în practică, iar cercetarea științifică din țara noastră, în acest sector, să ia o dezvoltare mereu ascendentă.

AUTORUL

INTRODUCERE

ETAPE ALE STUDIULUI REZISTENȚEI LA SOLICITĂRI VARIABILE

Dezvoltându-se mereu, studiul rezistenței la solicitări variabile s-a transformat, dintr-o metodă, într-o ramură importantă a rezistenței materialelor în construcția de mașini. Din punct de vedere metodic, acest studiu poate fi sistematizat în următoarele etape, care constituie și capitole componente ale acestui volum:

- a) *definirea solicitării variabile* și a noțiunilor de bază în legătură cu această solicitare;
- b) *definirea rezistenței la oboseală* și stabilirea corelației între aceasta și celelalte proprietăți mecanice ale materialelor;
- c) *determinarea experimentală*, prin diferite metode, a rezistenței la oboseală (stabilirea epruvetelor, a mașinilor de încercat, a metodelor de experimentare);
- d) *studiul factorilor care influențează rezistența la oboseală*;
- e) *determinarea metodelor tehnologice și constructive de îmbunătățire a rezistenței la oboseală*;
- f) *determinarea metodelor de calcul la solicitări variabile*.

Problemele cuprinse sub aceste titluri au făcut, în cei peste 100 ani de când se studiază oboseala materialelor, obiectul a multe mii de studii. De aceea, alături de lucrări care se ocupă — ca și cea de față — de aspectul multilateral al acestei probleme [24], [38], [50], [57], [80], numeroase monografii și congrese au ca obiect numai anumite aspecte ale problemei, cum ar fi: teoriile asupra ruperii prin oboseală, mașini de încercat la oboseală, concentrarea eforturilor unitare, studiul efectului anumitor factori asupra rezistenței la oboseală, metode tehnologice de mărire a rezistenței la oboseală, calculul la oboseală aplicat unor piese de mașini etc.

NOTAȚII

Se vor preciza, în cele ce urmează, notațiile folosite în cursul lucrării. Pentru o parte din ele, justificarea alegerii simbolurilor se face în cadrul expunerii. Ca punct de plecare s-au luat standardele pentru rezistența materialelor STAS 1963-50 și STAS 1965-50. Prevederile acestor standarde sînt insuficiente pentru problema de față și se așteaptă apariția unui standard special pentru solicitări variabile. Majoritatea simbolurilor folosite s-au luat din literatura străină de specialitate consultată. Uneori a fost nevoie a se introduce notații noi, proprii, spre a nu se confunda cu alte simboluri din literatura tehnică românească.

a. Caracteristici mecanice la solicitări statice

- σ_r — rezistență de rupere la întindere (tracțiune);
- σ_{rc} — rezistență de rupere la compresiune;
- σ_{ri} — rezistență de rupere la încovoiere;
- τ_r — rezistență de rupere la răsucire;
- σ_c — limită de curgere la întindere;
- σ_{ci} — limită de curgere la încovoiere;
- τ_c — limită de curgere la răsucire;
- σ_e, τ_e — limite de elasticitate;
- δ_5, δ_{10} — alungiri la rupere;
- ψ — gătuire la rupere;
- HB — duritate Brinell;

b. Cicluri de solicitări variabile

- σ_{max}, τ_{max} — eforturi unitare maxime ale ciclului;
- σ_{min}, τ_{min} — eforturi unitare minime ale ciclului;
- σ_m, τ_m — eforturi unitare medii ale ciclului;
- σ_v, τ_v — amplitudinile eforturilor unitare ale ciclului;
- R — coeficient de asimetrie a ciclului.

c. Rezistențe la oboseală

- σ_R, τ_R — rezistențe la oboseală pentru ciclu asimetric oarecare;
- σ_{-1}, τ_{-1} — rezistențe la oboseală pentru ciclu simetric;
- σ_0, τ_0 — rezistențe la oboseală pentru ciclu pulsator;

- σ_{-1} — rezistență la oboseală pentru ciclu simetric de încovoiere;
- σ_{-1t} — rezistență la oboseală pentru ciclu simetric de întindere-compresiune;
- τ_{-1} — rezistență la oboseală pentru ciclu simetric de răsucire;
- σ_0 — rezistență la oboseală pentru ciclu pulsator de încovoiere;
- σ_{0t} — rezistență la oboseală pentru ciclu pulsator de întindere;
- σ_{0c} — rezistență la oboseală pentru ciclu pulsator de compresiune;
- τ_0 — rezistență la oboseală pentru ciclu pulsator de răsucire;

$\sigma_{+1} = \sigma_r, \tau_{+1} = \tau_r$ — rezistențe de rupere statice;

N — număr de cicluri;

N_B — număr de cicluri convențional pentru determinarea rezistenței la oboseală;

$\sigma_{0L} = \sigma_L, \sigma_{mL}, \tau_{0L} = \tau_L, \tau_{mL}$ — coordonatele unui punct de pe diagrama ciclurilor limită.

d. Factori ce condiționează rezistența la oboseală

- σ_n, τ_n — eforturi unitare nominale în concentrator;
- σ_M, τ_M — eforturi unitare maxime în concentrator;
- α_k — coeficient de concentrare a eforturilor unitare la solicitări statice;
- β_k — coeficient efectiv de concentrare la solicitări variabile;
- $\beta_{k\sigma} = \beta_\sigma$ — coeficient efectiv de concentrare la eforturi unitare normale;
- $\beta_{k\tau} = \beta_\tau$ — coeficient efectiv de concentrare la eforturi unitare tangențiale;
- β_{kP} — coeficient efectiv de concentrare al piesei;
- $(\beta_k)_{d0}$ — coeficient efectiv de concentrare determinat pe epruvete cu diametrul d_0 ;
- $(\beta_k)_{d1}$ — coeficient efectiv de concentrare determinat pe epruvete cu diametrul d_1 ;
- σ_{-1k}, τ_{-1k} — rezistențe la oboseală determinate pe epruvete cu concentratori;

$(\sigma_{-1})_{d0}, (\sigma_{-1})_d$ — rezistențe la oboseală determinate pe epruvete sau piese cu diametrul d_0, d ;
 $(\sigma_{-1k})_{d0}, (\sigma_{-1k})_d$ — rezistențe la oboseală determinate pe epruvete sau piese, cu concentratori, cu diametrul d_0, d ;
 $(\sigma_{-1})_{kP}$ — rezistența la oboseală a piesei reale ;
 $\varepsilon, (\varepsilon)_d, (\varepsilon)_{d1}$ — factori dimensionali la piese fără concentratori ;
 $\varepsilon_k, (\varepsilon_k)_{d1}, (\varepsilon_k)_d$ — factori dimensionali la piese cu concentratori ;
 η — coeficient de sensibilitate al materialului ;
 γ — coeficient de calitate a suprafeței sau al tratamentului termic ;
 c, c_σ, c_τ — coeficienți de siguranță la oboseală ;
 c_c — coeficient de siguranță față de limita de curgere ;
 c_g — coeficient de siguranță global ;
 c_N — coeficient de siguranță față de rezistența de durată ;
 c_d — coeficient de siguranță la durabilitate ;
 $\sigma_e, \sigma_{ue}, \sigma_{me}$ — eforturi unitare echivalente ;
 σ_a, τ_a — rezistențe admisibile.

Alte notații de circulație mai restrînsă vor fi precizate în cursul expunerii.

Capitolul 1

SOLICITAREA VARIABILĂ

1.1. SOLICITAREA VARIABILĂ PRIN CICLURI STAȚIONARE

Rezistența materialelor face distincție între două clase de solicitări, respectiv două feluri de sarcini :

- solicitări statice, cauzate de sarcini care cresc lent de la zero pînă la o valoare finală, rămînînd apoi constante ;
- solicitări dinamice, aplicate cu o viteză care nu poate fi neglijată.

La rîndul lor, solicitările dinamice pot fi :

- solicitări prin șoc, rezultînd dintr-o variație bruscă de viteză ;
- solicitări variabile continue, la care sarcina variază după diferite legi, fără discontinuitate.

Dintre solicitările variabile continue, cele mai importante în tehnică sînt acelea la care variația sarcinii este *periodică* (ciclică). În general, la mașini, variația sarcinii are loc după legi sinusoidale, care pot fi deformat, însă, prin fenomene secundare. Studiul experimental al rezistenței la oboseală arată că fenomenul fizic al ruperii este condiționat de valorile extreme pe care le ia efortul unitar în decursul unui ciclu, și nu de legea de variație între aceste valori. Solicitățile variabile ciclice se întîlnesc la numeroase piese de mașini, cum se va vedea din ultimul capitol al lucrării.

În studiul solicitărilor variabile ciclice se consideră că eforturile unitare în secțiunea studiată variază în timp periodic, cu o frecvență oarecare, conform diagramei din fig. 1.1. Variația

efortului unitar poate rezulta din variația sarcinilor (de exemplu la piesele mecanismului bielă-manivelă al unui motor cu piston) sau din schimbarea poziției relative între piesa în mișcare și sarcinile de mărime constantă (osia vagonului de cale ferată). Se fac următoarele definiții:

a. Totalitatea valorilor pe care le ia efortul unitar, pornind de la o valoare oarecare pînă ajunge din nou la aceeași valoare (variind în același sens), formează un *ciclu* de solicitare variabilă. De exemplu *ACB* sau *CBD* din fig. 1.1.

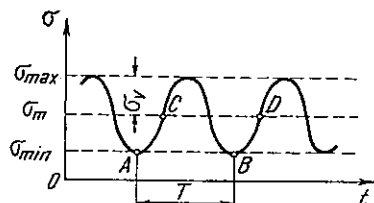


Fig. 1.1.

b. În decursul unui ciclu, efortul unitar trece o singură dată printr-o valoare maximă, numită *efort unitar maxim* σ_{max} și o valoare minimă, *efort unitar minim* σ_{min} ¹⁾. Dacă solicitarea produce eforturi unitare tangențiale, atunci limitele ciclului sînt τ_{max} și τ_{min} . Adeseori se vorbește de *cicluri ale sarcinilor*, cu limite F_{max} , F_{min} , sau *cicluri ale eforturilor*: forțe axiale N_{max} , N_{min} , momente încovoietoare M_{max} , M_{min} , momente de răsucire M_{tmax} , M_{tmin} .

c. Valoarea medie a efortului unitar al ciclului este *efortul unitar mediu*

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.1)$$

d. Diferența dintre valoarea maximă și cea medie, sau dintre cea medie și cea minimă, este *amplitudinea efortului unitar*²⁾

$$\sigma_v = \sigma_{max} - \sigma_m = \sigma_m - \sigma_{min} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

¹⁾ În literatura tehnică germană, cele două limite poartă numele de efort unitar superior σ_0 și efort unitar inferior σ_v .

²⁾ În literatura tehnică sovietică, amplitudinea efortului unitar se notează cu σ_a , iar în cea germană cu σ_A . S-a ales simbolul σ_v , spre a nu se face confuzie cu simbolul rezistenței admisibile σ_a .

Cu notațiile stabilite se pot scrie și relațiile

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_v; \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_v. \quad (1.3)$$

Un ciclu de solicitări variabile este definit prin perechea de valori σ_{max} , σ_{min} sau prin σ_m , σ_v .

e. Se numește *coeficient de asimetrie* al ciclului raportul

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.4)$$

f. Dacă pe toată durată de aplicare a solicitării variabile eforturile unitare variază între aceleași valori σ_{max} , σ_{min} , atunci se zice că *ciclurile sînt staționare*. Majoritatea studiilor ce s-au efectuat pînă acum asupra solicitărilor variabile — respectiv cele care vor fi expuse în această lucrare — se referă la solicitări prin cicluri staționare.

După valorile și semnele algebrice pe care le au limitele σ_{max} , σ_{min} , respectiv după valorile și semnele coeficientului de asimetrie R se disting diferite feluri de cicluri, a căror sistematizare a fost făcută în tabela 1.1.

Se numește *ciclu simetric* (poziția 5 din tabela 1.1) acela care are

$$R = -1; \quad \sigma_{max} = -\sigma_{min}; \quad \sigma_m = 0; \quad \sigma_v = \sigma_{max}.$$

Toate celelalte cicluri care au $R \neq -1$ se numesc *cicluri asimetrice*.

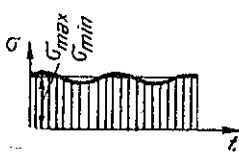
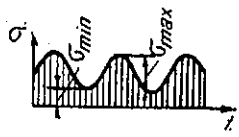
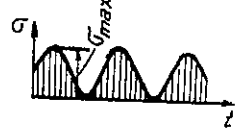
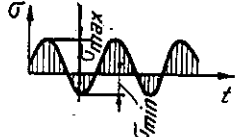
Ciclurile ale căror eforturi unitare rămîn de același semn se numesc *oscilante* (pozițiile 2, 3, 7, 8). Ele pot fi cicluri *oscilante pozitive* (pozițiile 2, 3), respectiv *negative* (pozițiile 7, 8).

Cazurile limită de cicluri oscilante, la care una dintre valorile extreme ale efortului unitar se anulează, sînt *cicluri pulsatoare*. Ciclul pulsator pozitiv (poziția 3) are $R=0$, iar cel pulsator negativ (poziția 7) are $R=\pm\infty$. Ca un caz limită de cicluri oscilante — cînd amplitudinea σ_v devine practic nulă — sînt *solicitările statice* (pozițiile 1 și 9 din tabela 1.1) care au $R=+1$.

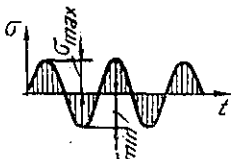
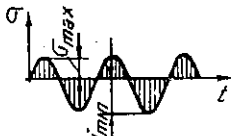
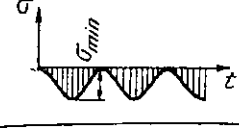
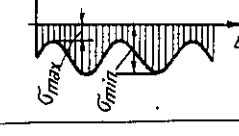
Ciclurile la care eforturile unitare schimbă de semn (pozițiile 4, 5, 6) sînt *cicluri alternante*. Ele au coeficient de asimetrie negativ. Cel mai important, din punct de vedere teoretic și practic, este *ciclul alternant simetric* (poziția 5) care are $R=-1$.

Tabela 1.1

Cicluri de solicitări variabile

Poziția	Ciclu1	$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	σ_m, σ_v	R
1		$\sigma_{max} = \sigma_{min} > 0$	$\sigma_m = \sigma_{max} = \sigma_{min}$ $\sigma_v = 0$	$R = +1$
2		$\sigma_{max} > 0; \sigma_{min} > 0$	$\sigma_m > 0; \sigma_v \neq 0$	$0 < R < +1$
3		$\sigma_{max} > 0; \sigma_{min} = 0$	$\sigma_m = \frac{1}{2} \sigma_{max} = \sigma_v$	$R = 0$
4		$\sigma_{max} > 0; \sigma_{min} < 0$ $\sigma_{max} > \sigma_{min} $	$\sigma_m > 0$ $\sigma_v \neq 0$	$-1 < R < 0$

12

5		$\sigma_{max} = -\sigma_{min} > 0$ $\sigma_{min} < 0$	$\sigma_m = 0$ $\sigma_v = \sigma_{max}$	$R = -1$
6		$\sigma_{max} > 0; \sigma_{min} < 0$ $\sigma_{max} < \sigma_{min} $	$\sigma_m < 0; \sigma_v \neq 0$	$-\infty < R < -1$
7		$\sigma_{max} = 0; \sigma_{min} < 0$	$\sigma_m = -\frac{1}{2} \sigma_{min}$ $\sigma_v = \left \frac{1}{2} \sigma_{min} \right $	$R = \pm \infty$
8		$\sigma_{max} < 0; \sigma_{min} < 0$	$\sigma_m < 0; \sigma_v \neq 0$	$+1 < R < +\infty$
9		$\sigma_{max} = \sigma_{min} < 0$	$\sigma_m = \sigma_{max} = \sigma_{min}$ $\sigma_v = 0$	$R = +1$

13

1.2. SOLICITAREA VARIABILĂ PRIN CICLURI NESTAȚIONARE

Atunci cînd limitele σ_{max} , σ_{min} ale ciclului nu se mențin invariabile pe timp nedefinit, piesa este supusă la cicluri nestaționare de solicitări. Acestea pot fi de diferite feluri: variind în mod ne-

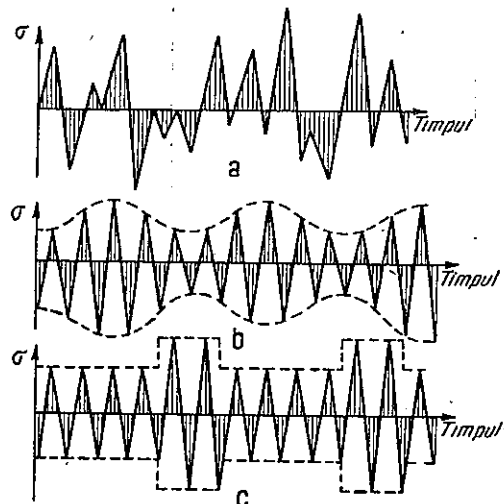


Fig. 1.2.

regulat (fig. 1.2, a), variind periodic și continuu (fig. 1.2, b), variind periodic și discontinuu (fig. 1.2, c) etc. Un studiu mai amănunțit asupra acestor feluri de solicitări se va face la cap. 6.

Capitolul 2

REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

2.1. REZISTENȚA LA OBOSEALĂ. CURBA LUI WÖHLER

Încă din prima jumătate a secolului al XIX-lea, o dată cu dezvoltarea construcției de mașini, s-a observat că piesele supuse la solicitări variabile rezistă mai puțin decît cele supuse la solicitări statice. În 1839, Poncelet, publicînd lecțiile sale asupra proprietăților fizico-mecanice ale materialelor, a dat acestui fenomen denumirea de *oboseală* (în limba franceză *fatigue*, în engleză *fatigue*, în rusă *УСТАЛОСТЬ*, în germană *Ermüdung*). Cercetări sistematice asupra oboselii au fost întreprinse de August Wöhler, care a organizat, în 1852, un laborator de încercare la oboseală a osiilor de vagoane, pentru a determina rezistența lor la oboseală. Abia în 1910 s-a construit prima dată graficul pentru determinarea rezistenței la oboseală, căruia i s-a dat numele de curba lui Wöhler.

Pentru determinarea rezistenței la oboseală, se confecționează, din materialul ce trebuie cercetat, un număr de cel puțin 8 epruvete, identice ca formă, dimensiuni și grad de prelucrare. Se presupune că este vorba de un oțel și că se face încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă (cum se va descrie în cap. 3), la cicluri simetrice.

Cunoscînd rezistența de rupere statică σ_r , se încearcă prima epruvetă la cicluri simetrice avînd $\sigma_{max} = 0,6 \sigma_r$ și se constată că ea se rupe după N_1 cicluri. Notînd $\sigma_{max} = \sigma_1$, cu perechea de valori σ_1, N_1 se reprezintă punctul 1 în planul axelor de coordonate σ_{max}, N (fig. 2.1). Epruveta următoare se încearcă la cicluri avînd $\sigma_{max} = \sigma_2 = \sigma_1 - (1 \dots 2 \text{ kgf/mm}^2)$ și se obține punctul 2 (σ_2, N_2). Micșorînd din ce în ce pe σ_{max} cu $1 \dots 2 \text{ kgf/mm}^2$, la trecerea de la o epruvetă la alta, se obține o serie de puncte cu care se

construiește diagrama din fig. 2.1, numită *curba lui Wöhler*, sau *curba de oboseală*. Asimptota curbei reprezentând cea mai mare valoare a lui σ_{max} la care epruveta nu se mai rupe, la oricâte cicluri ar fi solicitată, măsoară *rezistența la oboseală* a materialului la solicitarea la care a fost supus (încovoiere) și pentru coeficientul de asimetrie la care s-a făcut încercarea. Pentru ciclul simetric de încovoiere, rezistența la oboseală se notează cu σ_{-1} .

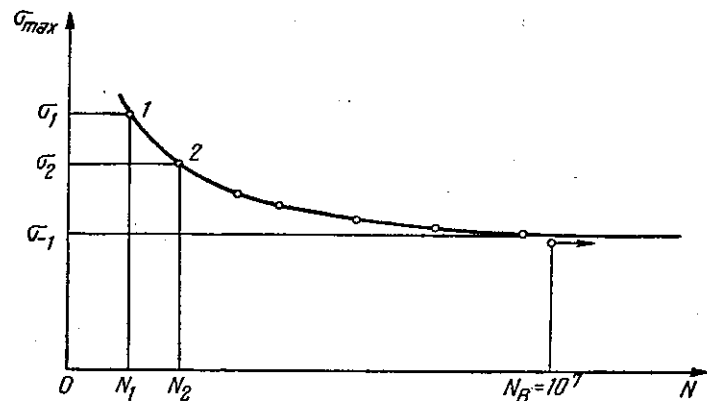


Fig. 2.1.

În literatura străină, această mărime poartă următoarele denumiri: ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ (rusă), limite de fatigue (franceză), fatigue strength (engleză), Dauerfestigkeit (germană).

Practic, încercarea epruvetelor care nu se rup este întreruptă, pentru oțel, la $N_B = 10^7$ cicluri. Ca urmare, efortul unitar σ_{max} al epruvetei care nu s-a rupt pînă la 10^7 cicluri este egal sau inferior rezistenței la oboseală.

Spre deosebire de proprietățile de rezistență statice, care sînt în număr limitat, orice material are o infinitate de rezistențe la oboseală, după valoarea coeficientului de asimetrie la care se face experimentarea și după felul solicitării. Ca urmare, simbolurile σ și τ pentru rezistența la oboseală sînt însoțite de indicele -1 pentru cicluri simetrice, de indicele 0 pentru cicluri pulsatoare, sau de indicele R (avînd orice valoare numerică) pentru alte feluri de cicluri. În plus, se afectează și cu indicii t sau c , rezistențele la oboseală pentru cicluri de întindere, respectiv compresiune. Ca urmare, simbolurile folosite pentru rezistențele la oboseală sînt cele din tabela 2.1.

Simboluri pentru rezistențe la oboseală

Tabela 2.1

Felul solicitării	Felul ciclului			
	Simetric	Pulsator	Oarecare	Solicitare statică
Întindere-compresiune	σ_{-1t}	—	σ_{Rt}	—
Întindere	—	σ_{0t}	σ_{Rt}	$\sigma_{+1t} = \sigma_r$
Compresiune	—	σ_{0c}	σ_{Rc}	$\sigma_{+1c} = \sigma_{rc}$
Încovoiere	σ_{-1}	σ_0	σ_R	$\sigma_{+1} = \sigma_{rl}$
Răsucire	τ_{-1}	τ_0	τ_R	$\tau_{+1} = \tau_r$

Curba lui Wöhler devine mai sugestivă atunci cînd este reprezentată în coordonate semilogaritmice, adică luînd scară logaritmică pentru abscise. Astfel, dacă încercarea la solicitări variabile ar începe cu prima epruvetă solicitată la $\sigma_{max} = \sigma_r$ (ceea ce va cauza ruperea în primul ciclu), deci dacă scara absciselor ar cuprinde domeniul $N=1 \dots \infty$, curba de oboseală ar avea aspectul

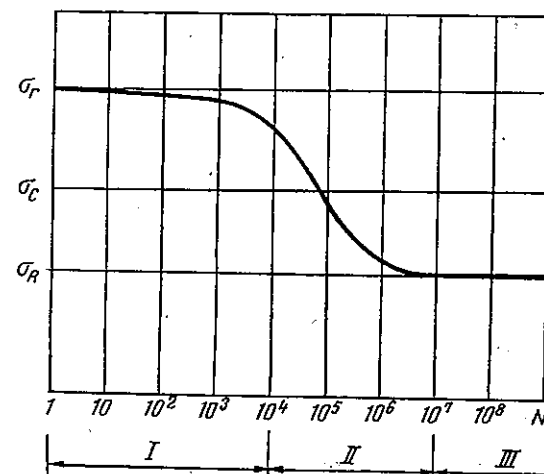


Fig. 2.2.

din fig. 2.2 [24]. Ea poate fi împărțită în trei zone: *I* — solicitări statice sau puțin variabile; *II* — solicitări variabile de durată limitată, cu valori descendente ale rezistenței materialului; *III* — solicitări variabile de durată nelimitată (zona rezistenței la oboseală). În practica determinării rezistenței la oboseală, încercările

încep numai din zona II, cu alte cuvinte la valori σ_{max} pe care epruveta le suportă cel puțin 10^4 cicluri. Ca urmare, forma practică a curbei lui Wöhler în coordonate semilogaritmice este cea

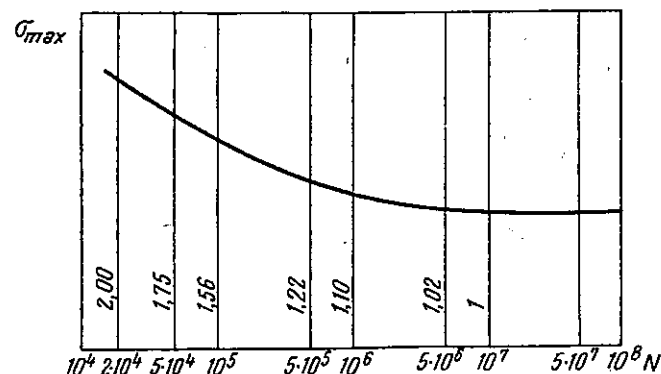


Fig. 2.3.

din fig. 2.3 [24]. Pe acest desen s-a notat cu 1 rezistența la oboseală și cu coeficienți mai mari decât 1 raportul între rezistența de durată limitată și rezistența la oboseală.

2.2. FENOMENUL FIZIC AL RUPERII PRIN OBOSEALA

În decursul celor peste 100 ani de cercetări, unul din subiectele cele mai frecvente a fost acela al cauzelor și modului de producere a rupturii de oboseală, respectiv al deosebirii între modul cum se produce ruperea la solicitări statice și cea de oboseală.

De la început se face distincție între două feluri de corpuri: pe de o parte metalele și aliajele utilizate în tehnică, formate din cristale fine, dirijate în toate direcțiile, metale care se consideră omogene și izotrope; pe de altă parte, cristalele izolate, care au proprietăți de anizotropie. Legile teoriei elasticității și plasticității, în forma lor clasică, se aplică suficient de exact primelor corpuri, dar devin inexacte pentru monocristale.

Metalele și aliajele industriale sînt formate din cristale fine, numite cristalite, dirijate oricum în interiorul corpului. În afară de acestea, spațiile dintre cristalite sînt ocupate de incluziuni de materiale străine, sau pori, care pot fi amorse de fisuri. În timpul solicitării piesei, în unele cristalite, așezate defavorabil față de direcția efortului, se produc deformări plastice mari, deci apar *lunecări*, care modifică poziția relativă a grăunților. În anumite

limite, această redistribuire a poziției cristalitelor produce fenomenul de *întărire* sau *ecruisare*. Acest fenomen are loc în mod curent și cu ocazia prelucrărilor mecanice la rece ale metalelor. Cînd însă lunecările produse în cristalite depășesc anumite valori, apar *benzi de lunecare*, vizibile la microscopul metalografic, constituind cauze de microfisuri. Fiecare microfisură devine concentrator de eforturi unitare și cauzează alte fisuri, a căror extindere produce ruperea prin oboseală.

Ruptura prin oboseală a metalelor tenace are un aspect caracteristic, care permite să fie ușor identificată. În primul rînd, datorită faptului că efortul este variabil, nu au loc deformări plastice accentuate, respectiv nu apare gîtuirea ce precede ruperea statică; metalul se rupe similar celui fragil. În al doilea rînd, în secțiunea piesei rupte prin oboseală apar două zone distincte: una lucioasă, datorită frecării materialului în timpul dezvoltării fisurii, și una grăunțoasă, în partea în care are loc ruptura finală, bruscă (fig. 2.4). Adeseori fisura de oboseală nu se propagă continuu, cu aceeași viteză, ci cu intermitențe, datorite perioadelor de oprire amănunții, sau de solicitare redusă, care fac ca fisura



Fig. 2.5.



Fig. 2.4.

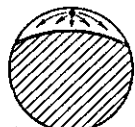
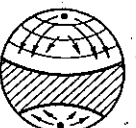
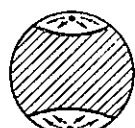
să nu avanseze. În asemenea cazuri (fig. 2.5) apare în secțiunea de rupere o serie de *linii de repaus*, care arată atât locul fisurii inițiale, cît și modul de propagare a ei.

În tabela 2.2 se arată, schematizat, aspectul rupturii de oboseală, la solicitări de încovoiere și întindere-compresiune, a epruvetei cu și fără creștături.

Atunci cînd solicitările variabile sînt mici, fisura se propagă aproape pe întreaga secțiune, iar ruptura finală (partea hașurată)

Tabela 2.2

Rupturi de oboseală

Felul solicitării	Epruvetă netedă		Epruvetă cu creștătură înelară
	Solicitare mică	Solicitare mare	Solicitare mică
Încovoiere rotativă			
Încovoiere plană			
Întindere-compresiune			

ocupă o mică parte a secțiunii. În acest caz se poate urmări bine propagarea fisurii, cu ajutorul liniilor de repaus. S-au marcat pe desene, printr-un punct, locul fisurii inițiale, iar prin săgeți, direcțiile de propagare a fisurii. Din contra, la solicitări puternice, fisura se extinde pe o mică porțiune a secțiunii, după care urmează ruperea fragilă.

La solicitarea de încovoiere plană, fisura se propagă din două părți, pe când la cea de încovoiere rotativă și cea de întindere-compresiune, dintr-o singură parte a secțiunii. Un aspect deosebit prezintă rupura epruvetelor cu creștătură.

Amănunte interesante asupra aspectului ruperii prin oboseală pot fi găsite în lucrările [25], [41], [63], [80], [82], [87].

La materialele fragile nu pot fi observate cele două zone specifice ruperii de oboseală; aici, după producerea primei fisuri, rupura are loc brusc, pe întreaga secțiune.

În jurul fenomenului fizic de apariție a primei microfisuri și de dezvoltare a ei s-au născut numeroase teorii asupra ruperii

prin oboseală. O sistematizare a lor [86] ar putea fi făcută, în mod aproximativ, astfel:

a. **Teoria procesului de întărire.** Formulată prima dată de către H. T. Gaugh și D. Hanson (1923), teoria întăririi pornește de la ideea că solicitarea variabilă ciclică micșorează limita de elasticitate a metalului și, ca urmare, au loc deformări plastice chiar la valori ale eforturilor unitare inferioare limitei de elasticitate statice. Ca urmare a acestui fenomen, se produc deformări plastice, care cresc din ce în ce mai mult. Procesul de apariție a ruperii de oboseală are trei etape: 1) dezvoltarea lunecărilor plastice, producând fenomenul de ecrusare; 2) apariția fisurii, din cauza lunecărilor; 3) dezvoltarea fisurii, ca urmare a fenomenului de concentrare a eforturilor unitare. Teoria procesului de întărire a fost dezvoltată de U. Dehlinger, E. Orowan etc.

b. **Teoria rezistenței de smulgere.** Teoria de rupere la solicitări statice formulată de G. V. Ujik susține că ruperea metalelor are loc atunci când efortul unitar maxim σ_1 atinge o anumită limită, numită *rezistență de smulgere* R_σ .

După Ujik, solicitarea variabilă mărește rezistența de lunecare a materialului și, în schimb, o micșorează pe cea de smulgere. Rezultă de aici altul faptul că ruperea se produce la eforturi unitare mai mici decât cele statice, cât și aspectul ruperii de oboseală, caracteristic ruperii fragile. Cercetări similare au fost făcute de S. I. Ratner [63].

c. **Teoriile energetice.** Numeroase teorii de oboseală pornesc de la examinarea buclei de histerezis plastic (fig. 2.6). După I. A. Oding, care a dat prima dată explicația ruperii la oboseală pe bază energetică, lățimea buclei de histerezis este o caracteristică a metalului, numită *viscozitate ciclică*. Pentru valori ale efortului unitar maxim al ciclului (σ_1 din fig. 2.6), superioare unei anumite limite, viscozitatea ciclică crește cu numărul de cicluri aplicate piesei, pînă se produce ruperea. La o anumită valoare a lui σ_{max} — care este tocmai rezistența la oboseală — are loc inițial o creștere a viscozității ciclice cu timpul, urmată apoi de o descreștere a ei, iar epruveta nu se mai rupe. Pentru valori ale lui σ_{max} mai coborâte, viscozitatea ciclică nu crește, ci rămâne constantă în timp, iar epruveta nu se rupe. Pe baza lucrărilor lui Oding [52], [53] s-au găsit explicații pentru legătura între

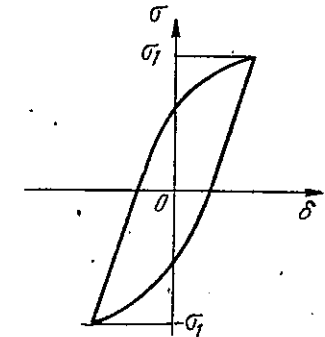


Fig. 2.6.

rezistențele la oboseală de întindere, compresiune, răsucire, încovoiere, pentru legătura între cele la solicitări simple și la solicitări compuse, pentru legătura între rezistența la oboseală a epruvetelor netede și a celor cu creștături. Și alți cercetători, cum sînt M. Kawamoto și K. Nischioka, B. A. Kuznețov, N. N. Davidenkov, T. A. Lebedev, N. F. Laško, au dezvoltat teoriile energetice asupra ruperii prin oboseală.

d. **Teorii de dislocație.** Printre cele mai noi teorii asupra ruperii prin oboseală, se numără cele bazate pe dislocația intercristalină. Aceste teorii se clădesc pe următoarele constatări:

- dislocația apare în metale, în procesul de cristalizare, dînd naștere unui mozaic de monocristale, orientate în mod neregulat;
- dislocația se continuă în procesul de deformare plastică a metalelor;

- cînd dislocația apare la suprafața piesei, ea dă naștere liniilor de lunecare;

- prin deplasarea dislocațiilor și trecerea lor peste obstacolele ce le înfilnesc, se produc goluri în rețeaua intercristalină;

- prin deplasarea dislocațiilor în sens contrar, paralel cu planele de lunecare, ele se pot anula, dar golurile rămîn, putînd da naștere apoi la fisuri.

Teoriile de dislocație au fost dezvoltate de F. E. Fujita, W. W. Weibull, A. M. Freudental, N. F. Mott și alții.

e. **Teorii statistice.** Printre cele mai cunoscute teorii statistice se numără cea formulată de N. N. Afanasiev. În baza acestei teorii, metalul este format dintr-o serie de cristale, de dimensiuni și orientări diferite, solicitate prin tensiuni interne și avînd proprietăți mecanice diferite. Fisura de oboseală apare atunci cînd în unele cristale amplitudinea eforturilor unitare depășește rezistența de smulgere. Problema determinării limitei de oboseală aparține statisticii matematice [1]. Teoriile statistice au fost dezvoltate și de către alți cercetători, cum sînt W. W. Weibull, Ia. I. Frenkel, T. A. Kontorova, A. M. Freudental etc.

Date interesante asupra teoriilor de rupere prin oboseală pot fi găsite în lucrările [1], [15], [21], [33], [41], [52], [63], [77], [79], [82], [86], [87], [90].

2.3. RELĂȚII ÎNTRE REZISTENȚELE LA OBOSEALĂ ȘI PROPRIETĂȚILE MECANICE LA EFORTURI STATICE

Pentru a determina o singură valoare a rezistenței la oboseală este necesară încercarea a cel puțin 6—8 epruvete, totalizînd mai multe milioane de cicluri de solicitări. Cunoașterea completă

a unui material, din punctul de vedere al oboselii, necesită determinarea mai multor rezistențe la oboseală, cel puțin pentru cicluri simetrice și pulsatoare, respectiv pentru solicitări de întindere-compresiune, încovoiere, răsucire. O astfel de experimentare devine foarte laborioasă și este împiedicată adeseori de lipsa de timp, de utilaje, iar uneori — pentru un anteproiect — poate să nu fie necesară. De aceea, în afara numeroaselor valori ale rezistențelor la oboseală, determinate pînă acum și care vor fi examinate mai departe, s-a stabilit, pe baza rezultatelor experimentale, o serie de relații empirice, care dau proprietățile de oboseală în funcție de alte proprietăți ale materialului. Aceste relații au însă valoare numai pentru materialele studiate și în condițiile de lucru în care au fost stabilite. De aceea, ele se vor fosoli cu rezervă și numai atunci cînd experimentarea directă (în primul rînd) sau documentația existentă nu pot furniza date mai certe.

Cele mai multe relații empirice dau rezistența la oboseală prin ciclul simetric σ_{-1} , în funcție de proprietățile mecanice la solicitări statice. O parte din relațiile cunoscute pentru oțeluri sînt date în tabela 2.3. Experiențele făcute au dus și la construirea unor grafice, care arată limitele maxime și minime, între care variază rezistența la oboseală σ_{-1} , funcție de σ_r . Un astfel de grafic este cel din fig. 2.7, limitele fiind cuprinse între curbele I și II. Relația de la poziția 2 din tabela 2.3 corespunde liniei AB, iar cea de la poziția 6, liniei DE din fig. 2.7.

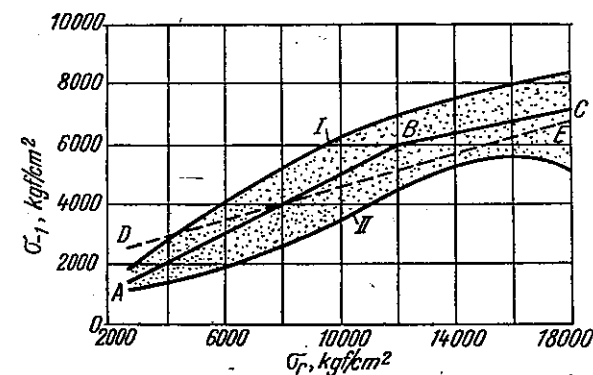


Fig. 2.7.

Pentru solicitări de întindere-compresiune și răsucire la oțeluri, relațiile pentru determinarea rezistențelor la oboseală sînt date în tabela 2.4. În aceeași tabelă sînt date relații pentru calculul rezistențelor la oboseală pentru fonte, aliaje de cupru, aliaje

Tabela 2.3

Relații empirice pentru calculul lui σ_{-1} la oțeluri

Nr. crt.	Felul oțelului	Relația de calcul	Autorul sau bibliografia
1	$\sigma_r < 50 \text{ kgf/mm}^2$	$\sigma_{-1} = 0,6 \sigma_r$	[24]
2	$50 < \sigma_r < 70 \text{ kgf/mm}^2$	$\sigma_{-1} = 0,5 \sigma_r$	[24]
3	$\sigma_r > 70 \text{ kgf/mm}^2$	$\sigma_{-1} = 0,4 \sigma_r$	[24]
4	—	$0,44 \sigma_r \leq \sigma_{-1} \leq 0,53 \sigma_r - 0,00041 \sigma_r^2$	Mașinostroenie
5	$\sigma_r = 120 \dots 180 \text{ kgf/mm}^2$	$\sigma_{-1} = 40 + \frac{1}{6} \sigma_r$	[57]
6	—	$\sigma_{-1} = 0,27 \sigma_r + 18,5$	S. L. Jukov
7	—	$\sigma_{-1} = 0,24 \sigma_c + 27,5$	S. L. Jukov
8	—	$\sigma_{-1} = 0,285 (\sigma_r + \sigma_c)$	R. Stribeck
9	—	$\sigma_{-1} = 0,25 (\sigma_r + \sigma_c) + 5$	E. Houdremont R. Mailänder
10	—	$\sigma_{-1} = 0,2 (\sigma_r + \sigma_c + \psi)$	A. Jünger
11	—	$\sigma_{-1} = 0,175 (\sigma_r + \sigma_c - \delta_{10} + 100)$	W. Lequis

• *Observație.* În aceste relații, σ_{-1} , σ_r , σ_c se măsoară în kgf/mm^2 , iar ψ și δ_{10} se dau în %.

de aluminiu. În ceea ce privește fontele, rezistențele de rupere statice la încovoiere și răsucire, folosite în tabela 2.4, se pot determina cu relațiile:

$$\sigma_{ri} = (1,6 \dots 2,0) \sigma_r; \quad (2.1)$$

$$\tau_r = (1,4 \dots 1,7) \sigma_r. \quad (2.2)$$

Tabela 2.4

Relații empirice pentru calculul rezistențelor la oboseală

Materialul	Ciclul	Încovoiere	Întindere-compresiune	Răsucire
Oțel	Simetric Simetric	— —	$\sigma_{-1H} = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{-1}$ $\sigma_{-1H} = (0,6 \dots 0,9) \sigma_r$	$\tau_{-1} = (0,55 \dots 0,58) \sigma_{-1}$
Oțel aliat	Simetric	—	$\sigma_{-1H} = 0,95 \sigma_{-1}$	—
Oțel carbon	Pulsator	$\sigma_0 = 1,5 \sigma_{-1}$	$\sigma_{0H} = 1,5 \sigma_{-1H}$	$\tau_0 = (1,8 \dots 2,0) \tau_{-1}$
Oțel aliat	Pulsator	$\sigma_0 = 1,6 \sigma_{-1}$	—	—
Oțel turnat	Simetric	$\sigma_{-1} = 0,4 \sigma_r$	—	—
Fonțe obișnuite	Simetric	$\sigma_{-1} = 0,22 \sigma_{ri}$	$\sigma_{-1H} = (0,35 \dots 0,45) \sigma_r$	$\tau_{-1} = (0,75 \dots 0,90) \sigma_{-1}$
	Simetric	$\sigma_{-1} = 0,4 \sigma_r$	$\sigma_{-1H} = (0,6 \dots 0,7) \sigma_{-1}$	—
Aliaje de cupru	Pulsator	$\sigma_0 = (1,2 \dots 1,5) \sigma_{-1}$	—	$\tau_0 = (1,2 \dots 1,3) \tau_{-1}$
	Simetric Pulsator	$\sigma_{-1} = (0,25 \dots 0,50) \sigma_r$	—	$\tau_{-1} = 0,58 \sigma_{-1}$ $\tau_0 = (1,4 \dots 2,0) \tau_{-1}$
Aliaje de aluminiu	Simetric Pulsator	$\sigma_{-1} = (0,25 \dots 0,50) \sigma_r$ $\sigma_0 = 1,8 \sigma_{-1}$	$\sigma_{-1H} = 0,7 \sigma_{-1}$	$\tau_{-1} = (0,55 \dots 0,58) \sigma_{-1}$ $\tau_0 = (1,4 \dots 2,0) \tau_{-1}$

Pentru oțeluri se întâlnesc în literatura tehnică și relații cu care se calculează rezistența la oboseală corespunzătoare unui ciclu cu coeficient de asimetrie oarecare R . Cîteva din acestea sînt redate în tabela 2.5. Aici, p_R este notație comună pentru σ_R , τ_R , iar p_{-1} notație comună pentru σ_{-1} , τ_{-1} .

Tabela 2.5

Relații pentru calculul rezistenței la oboseală pentru cicluri cu un coeficient de asimetrie R

Autorul	Relația de calcul
Johnson-Goodman	$p_R = \frac{3}{2-R} p_{-1}$
Gobell	$p_R = \frac{R+3}{2} p_{-1}$
Jasper	$p_R = \sqrt{\frac{2}{1+R^2}} \cdot \sigma_{-1}, R < 0$ $p_R = \sqrt{\frac{2}{1-R^2}} \cdot \sigma_{-1}, R > 0$
Oding	$p_R = \sqrt{\frac{2}{1-R}} \cdot \sigma_{-1}$
Mac-Adam	$\tau_R = \frac{2}{1-R} \cdot \tau_{-1}$

2.4. DIAGrame ALE REZISTENȚELOR LA OBOSEALA

În baza definițiilor date, orice material are o infinitate de rezistențe la oboseală, corespunzătoare tuturor valorilor posibile ale coeficientului de asimetrie. Pentru nevoile calculului, este util a cunoaște variația rezistenței la oboseală cu coeficientul de asimetrie. Reprezentările grafice ale acestor variații poartă numele de *diagrame ale rezistențelor la oboseală*.

2.4.1. Diferite feluri de diagrame ale rezistențelor la oboseală

Diversii cercetători au imaginat moduri variate de reprezentare grafică, după mărimile înscrise pe axele de coordonate ale diagramei. Astfel, luînd în coordonate mărimile σ_m și σ_v , se ob-

ține diagrama lui Haigh, reprezentată în fig. 2.8. În această diagramă, orice punct al planului de coordonate σ_m , σ_v reprezintă un ciclu de solicitare variabilă, ce poate fi aplicat epruvei sau piesei la care se referă graficul. Curba ABC este *linia ciclurilor limită*: suma coordonatelor unui punct oarecare, L , de pe această linie

$$OP + PL = \sigma_{mL} + \sigma_{vL} = \sigma_{max} L = \sigma_R$$

reprezintă rezistența la oboseală corespunzătoare ciclului cu coeficient de asimetrie R . Dacă R este dat, punctul L se găsește calculînd panta liniei OL

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_{mL}} = \frac{\sigma_v}{\sigma_m} = \frac{\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}}{\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}} = \frac{1-R}{1+R}. \quad (2.3)$$

Pe diagrama din fig. 2.8 se recunosc cele trei cicluri particulare: ciclul simetric, reprezentat de punctul A ; ciclul pulsator ($\sigma_m = \sigma_v = \frac{\sigma_0}{2}$) reprezentat de punctul B ; solicitarea statică (punctul C). Un ciclu oarecare reprezentat printr-un punct din interiorul curbei (de exemplu D), nu va cauza ruperea, pe cînd unul reprezentat printr-un punct exterior (E) cauzează ruperea prin oboseală.

Dacă se reprezintă σ_{max} , σ_{min} în funcție de σ_m , atunci se obține diagrama Smith (fig. 2.9). Diagrama este construită pentru solici-

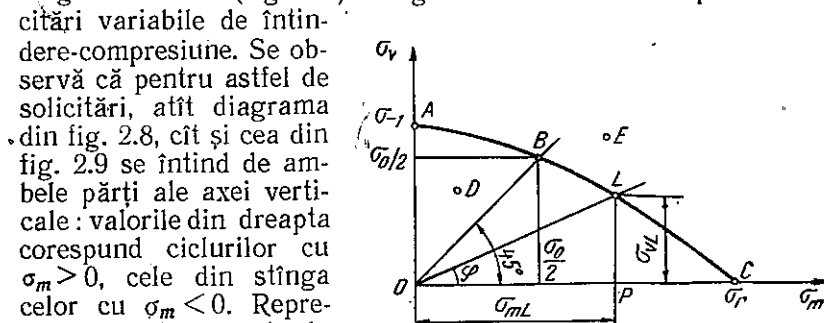


Fig. 2.8.

titări variabile de întindere-compresiune. Se observă că pentru astfel de solici-tări, atât diagrama din fig. 2.8, cât și cea din fig. 2.9 se întind de ambele părți ale axei verticale: valorile din dreapta corespund ciclurilor cu $\sigma_m > 0$, cele din stînga celor cu $\sigma_m < 0$. Reprezentarea diagramei de ambele părți ale axei verticale are importanță la materiale ce se comportă diferit la întindere față de compresiune (fontex); contrar, se reprezintă numai partea din dreapta axei verticale. Pe diagrama din fig. 2.9, un ciclu este

reprezentat printr-o pereche de puncte avînd aceeași abscisă (A_1A_2 , D_1D_2 etc.). Ciclurile limită sînt reprezentate prin puncte situate pe liniile σ_{max} și σ_{min} . Se recunosc: ciclul simetric (A_1A_2), ciclul pulsator pozitiv (B_1B_2), ciclul pulsator negativ ($B'_1B'_2$), solicitarea statică de întindere (C), solicitarea statică de compr-

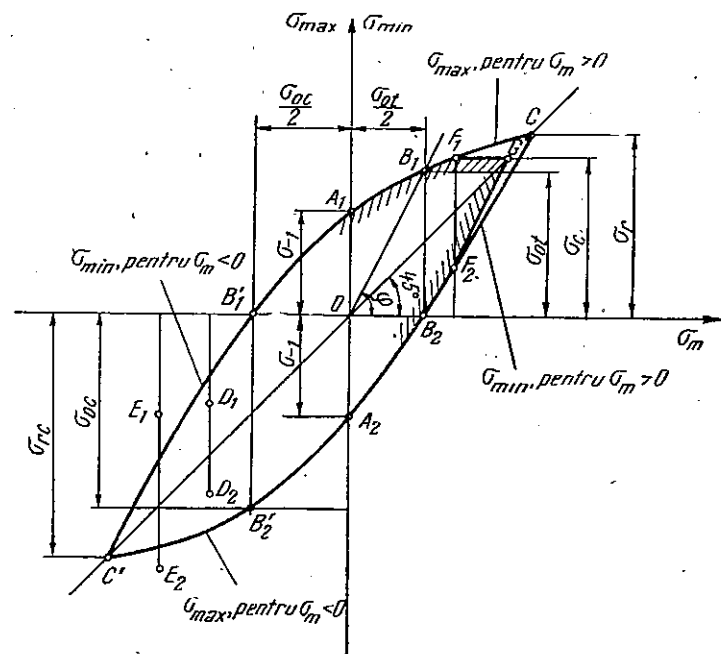


Fig. 2.9.

siune (C'), un ciclu oarecare nepericulos (D_1D_2), un ciclu ce cauzează ruperea (E_1E_2). Evident, în domeniul $\sigma_m < 0$, se consideră efort unitar σ_{max} cel mai mare în valoare absolută. De data aceasta, ordonata oricărui punct de pe linia σ_{max} reprezintă rezistența la oboseală pentru ciclul reprezentat de acel punct. Dacă se dă coeficientul de asimetrie R , punctul reprezentativ al ciclului se obține ducînd prin origine dreapta înclinată cu unghiul φ , unde

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{max}}{\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}} = \frac{2}{1+R}. \quad (2.4)$$

În literatura tehnică se întîlnesc și alte feluri de diagrame ale rezistențelor la oboseală: diagrama $\sigma_{max}, \sigma_{min} = f(\sigma_{min})$, după Gerber, Launhardt-Weyrauch, Goodman, Kommerell, Roș; diagrama $\sigma_{max} = f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{max}}\right)$, după Pohl; diagrama $\sigma_{max} = f(R)$, după Moore, Kommers, Jasper etc.

Studiul complet al rezistenței la oboseală a unui material comportă construirea a trei diagrame de rezistență la oboseală: pentru întindere-compresiune, încovoiere și răsucire. În general cele mai mari rezistențe la oboseală sînt pentru încovoiere, urmate de cele de întindere-compresiune, apoi de cele de răsucire. Se va construi, după caz, numai diagrama care prezintă interes în rezolvarea problemei ce se pune.

Diagramele rezistențelor la oboseală pot fi construite pe baza încercărilor a diferite feluri de epruvete sau piese:

- epruvete cu secțiune circulară, perfect lustruite, cu diametrul (în secțiunea de rupere) de 7,5—12,5 mm, în general 10 mm;
- epruvete de secțiune circulară, cu diametrul oarecare, mai mare de 12,5 mm;
- epruvete cu creștături;
- epruvete care au suferit diferite tratamente de mărire a rezistenței la oboseală;
- piese în forma, mărimea și cu tehnologia reală a fabricatului.

Primul fel de încercări, pe epruvete lustruite, cu diametrul în jurul a 10 mm, sînt cele care dau proprietățile mecanice de oboseală ale materialelor, așa cum se găsesc în manuale ingineresti. Încercările făcute chiar pe piesele reale sînt cele mai concludente, ele permițînd calculul cel mai sigur de rezistență la oboseală.

2.4.2. Schematizarea diagramei rezistențelor la oboseală

Construirea diagramei rezistențelor la oboseală, cu traseul lor real, ca niște curbe continue, de forma din fig. 2.8 și 2.9, este practic imposibilă, căci ar necesita un număr infinit de experiențe. De aceea, pentru scopurile practice, ele se înlocuiesc prin *diagrame schematizate*, construite pe baza cunoașterii cîtorva mărimi caracteristice: σ_r , σ_c , σ_{-1} , σ_0 .

În calculele la oboseală, valorile coeficienților de siguranță, în special pentru metale tenace, sînt relativ mici, coborînd uneori chiar la 1,1—1,2. Rezultă că dacă s-ar lua în considerație cicluri limită de pe linia EC a fig. 2.10, respectiv dacă s-ar aplica acestora coeficientul de siguranță, s-ar putea obține cicluri reale — admisibile — situate în zona Z , deci la care σ_{max} depășește limita de curgere a materialului. Astfel de solicitări sînt inadmisibile în construcțiile de mașini. Din acest motiv, pentru metalele care au limită de curgere, se micșorează suprafața diagramei ciclurilor limită (diagrama rezistențelor la oboseală), ducînd linia DEF la 45° , ca în fig. 2.10. Ca urmare, diagrama ciclurilor limită va fi formată din arcul de curbă AE și dreapta ED . În acest fel, pentru orice ciclu limită de pe linia ED , rezistența la oboseală ($\sigma_R = \sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_v$) va fi egală cu limita de curgere. Aceeași rețezare se aplică și în diagrama de tip Smith, prin trasarea liniei F_1GF_2 , fig. 2.9.

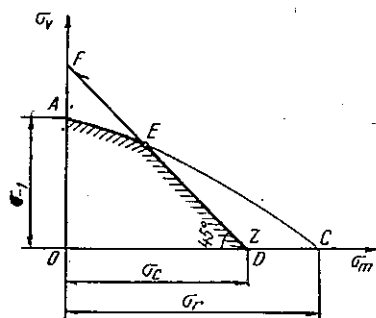


Fig. 2.10.

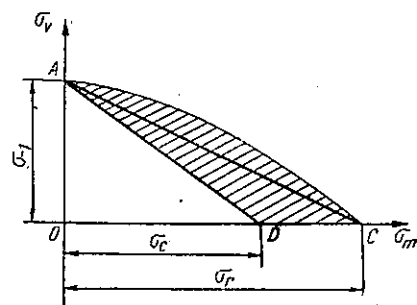


Fig. 2.11

Cea mai comodă schematizare a diagramei rezistențelor la oboseală, făcută de C. R. Soderberg, este aceea în care curba reală din fig. 2.11 se înlocuiește printr-o singură linie dreaptă: AC (determinată de σ_{-1} și σ_r), la materiale fragile, respectiv AD (cu σ_{-1} , σ_c), la materiale tenace. Dezavantajul metodei, în special la metale tenace, constă în aceea că se neglijează capacitatea de rezistență a materialului reprezentată de suprafața hașurată.

O reprezentare mai corectă, datorită profesorilor S. V. Serén-sen și R. S. Kinasoșvili, folosește trei din caracteristicile mecanice ale materialului: rezistența la oboseală prin ciclu simetric σ_{-1} , cea prin ciclu pulsator σ_0 și limita de curgere σ_c . Se ajunge astfel

la diagrama din fig. 2.12, care poate avea două variante, după cum punctul $B \left(\frac{\sigma_0}{2}, \frac{\sigma_0}{2} \right)$ este în afara sau în interiorul liniei CE , cu alte cuvinte, după cum $\sigma_0 > \sigma_c$ sau $\sigma_0 < \sigma_c$.

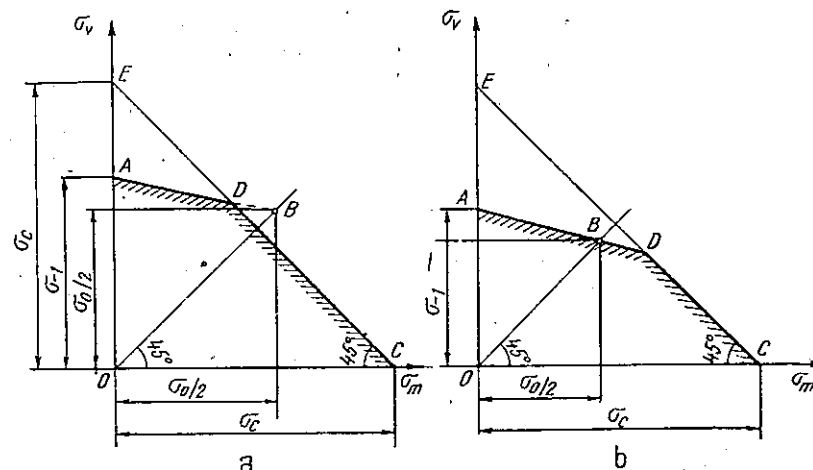


Fig. 2.12.

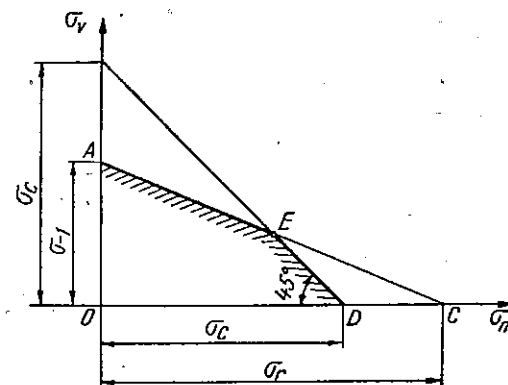


Fig. 2.13.

În caz de necunoaștere a rezistenței la oboseală σ_0 , se poate face schematizarea din fig. 2.13, bazată pe cunoașterea mărimilor σ_r , σ_c , σ_{-1} (Ujik).

Aceeași schematizare, pe baza valorilor σ_{-1} , σ_0 , σ_c , cu cele două variante ($\sigma_0 > \sigma_c$, respectiv $\sigma_0 < \sigma_c$) se întâlnește și în diagrama Smith din fig. 2.14 și 2.15. Dacă rezistența la oboseală prin ciclu

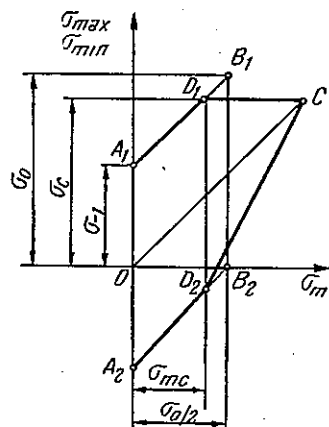


Fig. 2.14.

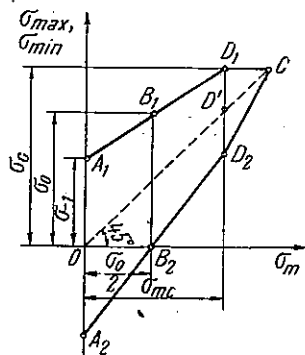


Fig. 2.15.

pulsator, σ_0 , nu este cunoscută, dar se cunoaște coeficientul caracteristic

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (2.5)$$

atunci se poate determina fie σ_0 , fie abscisa punctului D

$$\sigma_{mc} = \frac{\sigma_c - \sigma_{-1}}{1 - \psi}. \quad (2.6)$$

2.4.3. Cîteva exemple de diagrame schematizate pentru diferite materiale

—În cele ce urmează se dau cîteva exemple de forme tipice ale diagramelor rezistențelor la oboseală, pentru diferite materiale. La oțeluri, diagramele de tip Smith au forma din fig. 2.16 (cea desenată se referă la OL 38).

Diagramele pentru fonte, la solicitări de întindere-compresiune, sînt nesimetrice și se desenează de ambele părți ale axei verticale. Cea din fig. 2.17 se referă la o fontă cenușie cu $\sigma_r = 22 \text{ kgf/mm}^2$ [57], iar cea din fig. 2.18 la o fontă maleabilă cu $\sigma_r = 42 \text{ kgf/mm}^2$.

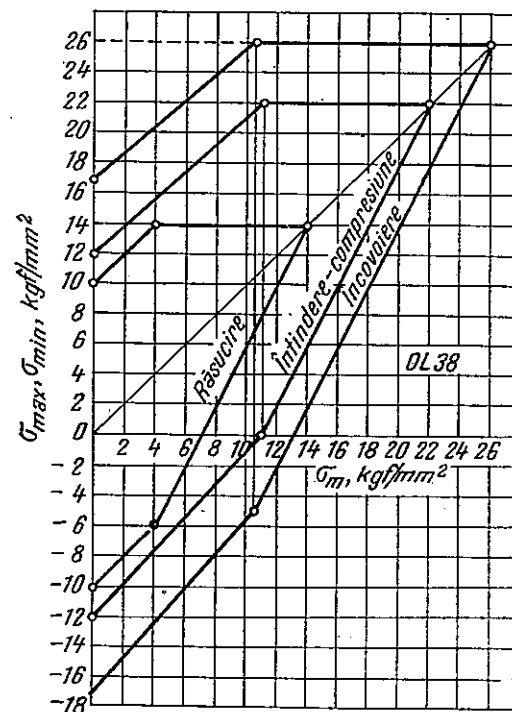


Fig. 2.16.

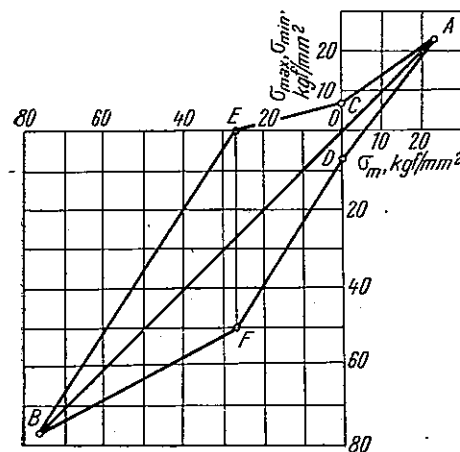


Fig. 2.17.

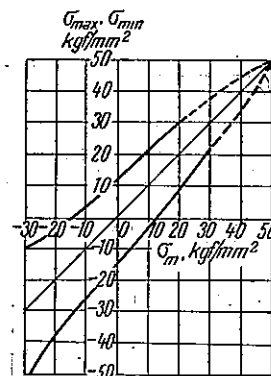


Fig. 2.18.

Diagrama din fig. 2.19 se referă la duraluminiu, avînd $\sigma_r = 59 \text{ kgf/mm}^2$, iar cea din fig. 2.20 este pentru trei feluri de aliaje de magneziu (după GOST), la solicitări de încovoiere.

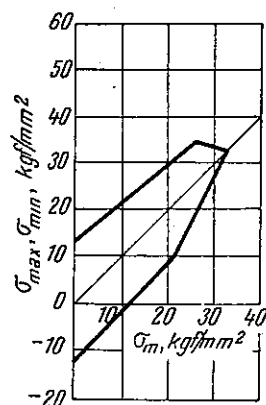


Fig. 2.19.

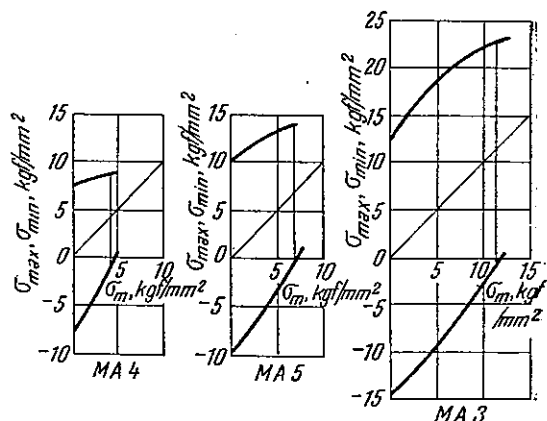


Fig. 2.20.

2.5. DATE ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE LA OBOSEALĂ ALE MATERIALELOR CURENT FOLOSITE

În manuale tehnice, se găsesc numeroase date referitoare la caracteristicile de oboseală ale materialelor curent folosite. În anexele I—VIII (de la sfîrșitul volumului) s-au redat o serie de tabele, pentru oțeluri, fonte, aliaje de cupru, aluminiu și magne-

Tabela 2.6

Caracteristici mecanice ale unor oțeluri carbon de calitate [46], [47]

Simbolul	Oțeluri în stare normalizată			Oțeluri în stare îmbunătățită		
	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/cm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²
OLC 35	50—62	29,5—41	26—33	58,8—88,3	45,4—75,5	32—45
OLC 45	62—72,5	35—44	27—35	65,7—87,7	42,3—68,8	34—46
OLC 60	66,5—81,5	35—48	30—36	78,2—97,0	52,6—68,1	38—47
OLC 43 AT	—	—	—	71,7—85,7	58,7—75,7	34—43
OLC 47 AT	—	—	—	72,5—98,2	47,2—89,6	34—46

ziu, după publicația „Metale și aliaje standardizate” [43] și după manualul enciclopedic sovietic „Справочник машиностроителя” vol. 3 [75]. În ultima vreme, s-au făcut încercări la oboseală și pentru diferite materiale plastice; unele rezultate se găsesc în lucrările [75], [85].

Încercări sistematice asupra rezistenței la oboseală a oțelurilor carbon de calitate, fabricate în țara noastră, au fost executate, în ultimii ani, la Baza de cercetări științifice a Academiei R.P.R. din Timișoara. Rezultatele acestor încercări sînt redată în tabela 2.6.

TEHNICA DETERMINĂRII REZISTENȚEI LA OBOSEALA

3.1. MAȘINI PENTRU ÎNCERCĂRI LA OBOSEALA

Mașinile pentru încercări la oboseală trebuie să realizeze aplicarea sarcinii asupra epruvetei, variația acesteia între limitele maximă și minimă și să permită modificarea acestor limite, la trecerea de la o epruvetă la alta. Ele trebuie să permită, uneori, schimbarea coeficientului de asimetrie al ciclului, spre a realiza diferite încercări de oboseală.

După STAS 5878-58, pentru încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă, mașinile trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- centrarea epruvetei, așa ca bătaia în dreptul punctului de aplicare a sarcinii să nu depășească 0,06 mm;
- aplicarea sarcinii fără șocuri;
- menținerea poziției și direcției de aplicare a sarcinii, pe tot timpul experimentării;
- sarcina să poată fi măsurată cu precizie de 1%;
- înregistrarea numărului de cicluri să se facă cu precizie de 1%;
- frecvența de solicitare să fie sub 10 000 cicluri pe minut.

3.1.1. Clasificare

Mașinile de încercat la oboseală pot fi clasificate după diferite criterii:

a) după felul solicitării: întindere, compresiune, întindere-compresiune, încovoiere, răsucire și solicitări compuse;

b) după coeficientul de asimetrie al ciclului: mașini pentru solicitări ce schimbă semnul și mașini pentru solicitări de un singur semn (*pulsatoare*);

Clasificarea mașinilor de încercat la oboseală [41]

Solicitarea	Modul de transmitere a sarcinii la epruvetă	Tipuri cunoscute de mașini
Întindere-compresiune	Cu mecanism bielă-mani-velă	Wöhler, Reynolds, Universitatea din Illinois
	Electromagnetic	Haigh, Lehr-Schenck
	Cu pulsator hidraulic	Amsler, Losenhausen, Werkstoffprüfmaschinen Leipzig
	Prin forțe de inerție	Smith, Schenck
Încovoiere pură, epruvete în rotație	Cu epruvete în consolă	Lehr, Thum, ЦНИИТМаш, Institutul Politehnic București, Baza Academiei R.P.R. Timișoara
	Cu epruvete având două reazeme, încărcate prin pîrghii	Lehr-Schenck, Institutul de mecanica construcțiilor al Academiei ucrainiene Mann
Încovoiere plană, epruvete în rotație	Cu epruvete pe două reazeme	Wöhler, Lehr
	Cu epruvete în consolă, încărcare directă	Wöhler, Морозов, Schenck, Amsler, Universitatea Illinois
	Cu epruvete în consolă, încărcare prin pîrghii	ЦНИИТМаш, Ниижт, Academia ucrainiană
	Cu epruvete în consolă, încărcare prin arcuri	Wöhler, Воропаев, Белякин, Timken, Westinghouse
Încovoiere într-un singur plan	Cu încovoiere pură	DVL
	Cu încovoiere plană	Moore, MAN, Хрущов, Михайловски
Răsucire	Cu mecanism bielă-mani-velă	Schenck, Krupp, Lehr
	Cu rezonanță, răsucire prin ciclu simetric	Schenck, ЦНИИТМаш
	Cu rezonanță, răsucire prin cicluri nesimetrice	Schenck

Tabela 3.1 (continuare)

Solicitarea	Modul de transmitere a sarcinii la epruvetă	Tipuri cunoscute de mașini
Solicitări compuse	Încercări de încovoiere și răsucire	Gough, Krause, Amsler
	Încercări la presiune interioară și forță axială	Universitatea Illinois
	Încercări la presiune interioară, forță axială și răsucire	Lehr-Prager
	Încovoiere într-un plan, răsucire și întindere	Institutul de mecanică al Academiei ucrainiene
	Întindere-compresiune pe două direcții	Schenck-Erlinger

c) după modul de producere a solicitării variabile: cu mecanism bielă-manivelă, cu pulsator hidraulic, cu acțiunea forțelor de inerție, cu sarcini constante și epruvete rotitoare, cu vibrator electrodinamic sau electromagnetic, cu autooscilații produse pe cale pneumatică etc.;

d) după obiectul încercat: mașini pentru încercat epruvete și mașini pentru încercat anumite piese de mașini (arcuri de foi, arcuri elicoidale, arbori cotiți etc.);

e) după legea de variație a efortului unitar în timpul încercării: mașini pentru încercat la cicluri staționare și mașini pentru încercat la cicluri variind după program.

O clasificare combinată, indicând și unele dintre cele mai cunoscute mașini — după constructor sau proiectant — datorită lui G. V. Ujik [41] este dată în tabela 3.1.

3.1.2. Câteva exemple de mașini de încercat la oboseală

Diversitatea și lărga răspândire a mașinilor de încercat la oboseală a făcut necesară apariția unor lucrări monografice, destinate constructorilor de astfel de mașini, ca și cercetătorilor în domeniul oboselei. Astfel, monografia publicată de S. V. Serensen, M. E. Garf și L. A. Kozlov, intitulată „Mașini pentru încercarea la oboseală” [71] se ocupă de diferite laturi ale problemei și anume: clasificare și scheme de funcționare, dinamica mașinilor, calculul și construcția elementelor componente, construcția,

reglarea, încercările și etalonarea mașinilor. De asemenea, în tratatul „Handbuch der Werkstoffprüfung”, vol. I, sub redacția lui E. Siebel, un capitol important se ocupă cu descrierea mașinilor de încercat la oboseală. În cele ce urmează se descriu, pentru orientare, câteva mașini tipice; pentru amănunte se va recurge la lucrările amintite.

3.1.2.1. Mașini pentru încercări de întindere și compresiune

a. Mașină cu mecanism bielă-manivelă. La mașina Jasper [71], având schema din figura 3.1, efortul unitar mediu al ciclului este realizat prin șurubul 2 și volantul 9, iar amplitudinea ciclului prin mișcarea manivelei 7.

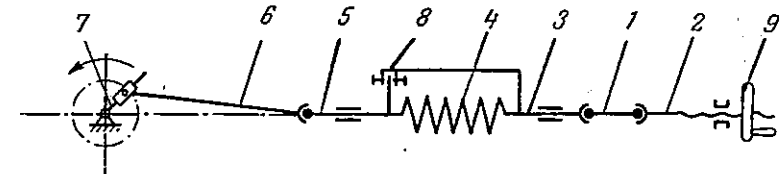


Fig. 3.1.

Epruveta 1 este așezată în falca de prindere 3. Epruveta este încărcată static de șurubul 2. Celelalte elemente ale mașinii sînt: arcul 4, tija 5, biela 6, manivela 7, contactul vibrator care măsoară sarcina 8 și volantul pentru reglarea sarcinii statice 9.

b. Pulsator hidraulic, cu mecanism bielă-manivelă. Sub denumirea de pulsator se înțelege nu o mașină, ci un grup de pompe, care se atașează mașinilor de încercat universale, spre a face posibile încercări la solicitări variabile de un singur semn (oscilante sau pulsa-toare). Modul de funcționare a grupului pulsator Amsler poate fi înțeles ușor cu ajutorul fig. 3.2 [71]. Pulsatorul are doi cilindri, 1 și 2, ale căror biele sînt acționate simultan de aceeași manivelă. Unul din cilindri 1 este fix, pe

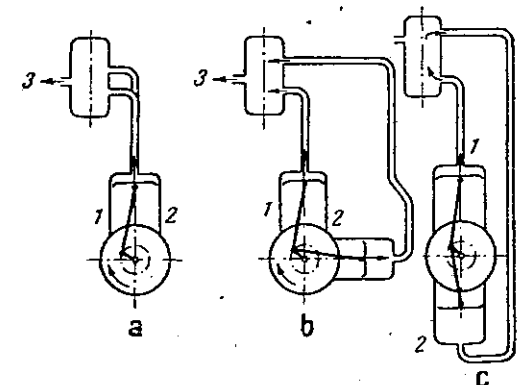


Fig. 3.2.

cînd celălalt poate fi rotit, așa ca în timpul funcționării să ocupe o poziție oarecare față de primul. În cilindru mașinii de încercat, forța statică — corespunzătoare efortul unitar σ_m al ciclului — este produsă de pompa principală, separată de grupul pulsator, pe cînd forța variabilă — care dă amplitudinea σ_v — este cauzată de pompele grupului pulsator. Cînd cei doi cilindri ai pulsatorului sînt paraleli fig. 3.2, *a*, debitele de ulei ale lor se adună și pulsatorul produce cea mai mare amplitudine a forței variabile. Cînd cilindrii sînt în opoziție, fig. 3.2, *c*, uleiul refulat de un cilindru este absorbit de celălalt, iar pulsatorul nu debitează. La o poziție oarecare a cilindrului 2, fig. 3.2, *b*, debitul produs de pulsator are o valoare oarecare, între zero și limita maximă. Săgeata 3 arată drumul uleiului spre cilindrul principal al mașinii.

În figura 3.3 se arată schema de funcționare a mașinii universale Amsler cu pulsator. Mașina este formată din coloanele 1, cilindrul principal 2, — capătul pistonului 3 legat de tijele 5 ale cadrului mobil, solidare cu traversa 6, pistonul 4, falcile mașinii 7 și 9, traversa inferioară 10 cu poziție reglabilă, după lungimea epruvetei, ventilul 11 prin care trece uleiul ce vine de la pompa principală (nefigurată pe desen), cilindrul reglabil 12 al pulsatorului, sistemul de măsurare și reglare 13, 14, 15, 16, 17, 18 a limitei superioare a sarcinii aplicate epruvetei 8, sistemul de măsurare 19, 20, 21 a limitei inferioare a sarcinii, ventilul 22 pentru completarea uleiului în circuitul pulsatorului, ventilul de reglare 23 a sarcinii statice, în timpul cînd pulsatorul nu lucrează. Sistemul de măsurare a limitei superioare a sarcinii funcționează astfel: în cilindrul 13 se deplasează pistonul 14, solidat cu

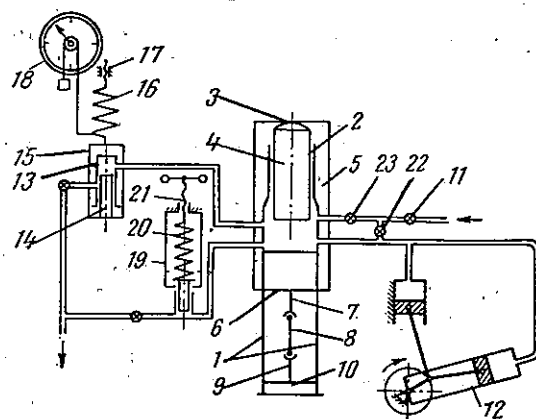


Fig. 3.3

cadrul 15, a cărui mișcare deplasează acul cadranelui 18 și întinde arcul 16, prevăzut în capăt cu șurubul 17. Cu ajutorul unui ventil rotativ, cilindrul 13 este pus în legătură cu cilindrul principal 2 numai în momentele cînd forța aplicată epruvetei are valoarea maximă. Reglînd șurubul 17, prin intermediul arcului 16, se schimbă

presiunea în cilindrul 13, ceea ce face să varieze debitul de ulei introdus de către pulsator în cilindru, deci însăși sarcina maximă a mașinii. În mod analog funcționează regulatorul 19, care poate modifica sarcina minimală a mașinii, prin reglarea arcului 20, comandat cu șurubul 21.

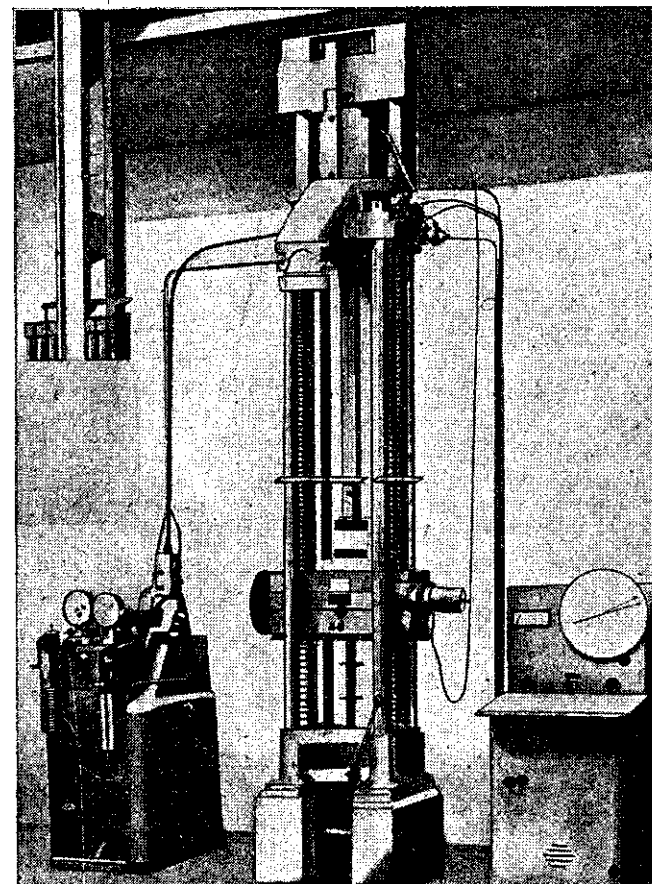


Fig. 3.4

În fig. 3.4 se arată mașina Amsler cu pulsator, avînd în stînga grupul pulsator, la mijloc mașina propriu-zisă, iar în dreapta pompa principală și manometrul pendul.

c. Mașină acționată prin forțe de inerție. Mașina Lehr-Schenck, reprezentată în fig. 3.5 [71] este formată din cadrul mașinii 1,

falca fixă 3, vibratorul 4, arcul 5 reglat prin volantul 6, servind la producerea forței statice asupra epruvetei 2 și reazemele 7 și 8 în formă de arcuri. Mașina poate produce forțe statice până la 50 tf și forțe variabile, cu amplitudini până la ± 25 tf. Forțele variabile pot fi reglate cu ajutorul vibratorului cu greutatea excentrice rotative.

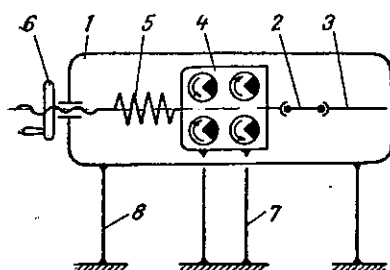


Fig. 3.5.

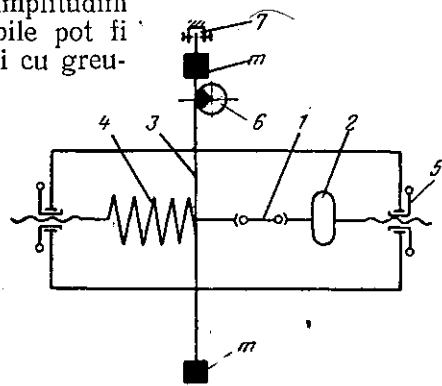


Fig. 3.6.

d. Mașină acționată prin forțe de inerție, lucrând la rezonanță. Mașina reprezentată schematic în fig. 3.6 este formată dintr-un dinamometru, 2, arcul lamelar 3, arcul 4, pentru producerea sarcinii statice, reglat prin volantul 5, vibratorul 6 cu masă excentrică și regulatorul de turație 7. Arcul 3 prevăzut cu masele m , formează un sistem oscilant, care este pus în vibrație de către vibratorul 6, așa ca să se realizeze rezonanța. Vibrațiile arcului determină forța variabilă în epruveta 1, a cărei mărime se măsoară cu dinamometrul 2. Regulatorul 7 are rolul de a menține turația motorului electric, pentru a păstra funcționarea la rezonanță. Cu astfel de pulsatoare prin rezonanță se produc sarcini de mai multe tone.

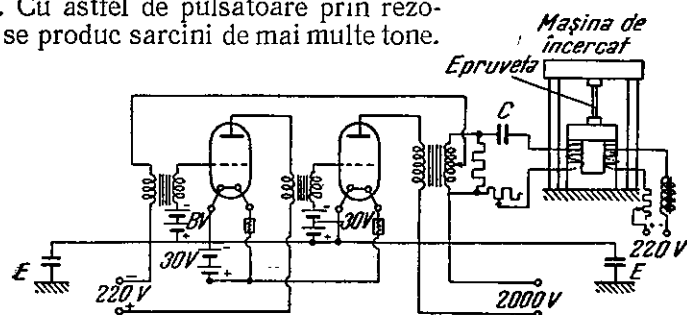


Fig. 3.7.

e. Mașină cu acționare electromagnetică. Schema din fig. 3.7 reprezintă o mașină cu acționare electromagnetică, de înaltă

frecvență. Sistemul oscilant este format din epruvetă — care lucrează ca un element elastic — și electromagnetul, alimentat de un amplificator cu tuburi electronice.

3.1.2.2. Mașini pentru încercări la răsucire

Mașina Lehr-Schenck cu acționare prin excentric. Mașina (fig. 3.8) are un capăt fix 1, al barei 3, care servește ca dinamometru de răsucire, un mecanism cu melc 2, care produce asupra

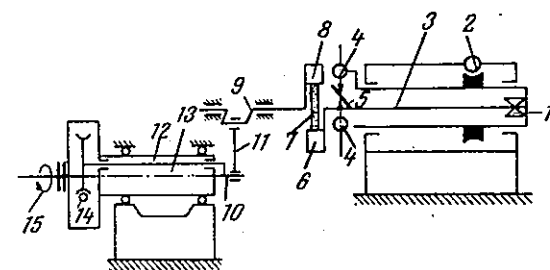


Fig. 3.8.

barei 3, deci și asupra epruvetei, un cuplu static inițial, câteva ceasuri comparatoare 4, acționate de capătul mobil 5 al barei 3, servind la măsurarea unghiului de deformare, deci a cuplului aplicat epruvetei. Epruveta 7 este fixată între falcile 6 și 8 și este solidară în punctul 6 cu dinamometrul 3. Mașina pentru încercări la răsucire mai este formată din arborele cotit 9, rotit de axul 10, prin intermediul bielei 11, mecanismul motor 12, comandat prin cuplajul 15, de la un motor electric, axul 13 al excentricului, a cărui excentricitate se poate regla prin mecanismul cu melc 14. Mașina poate executa fie încercări de încovoiere, fie încercări de răsucire. Variind excentricitatea axului 13, între zero și un maxim, se modifică unghiul de oscilație al arborelui 9, respectiv cuplul variabil aplicat epruvetei și măsurat de ceasurile comparatoare și axul 3, între zero și valoarea maximală.

3.1.2.3. Mașini pentru încercări de încovoiere

Mașinile pentru încercări la oboseală prin încovoiere sînt cele mai răspîndite, ele ajungînd la unele forme tipizate. Pentru încercările la oboseală prin încovoiere rotativă (sarcină constantă, produsă de greutatea și epruvetă rotitoare), STAS 5878-58 prevede

ca schemă de încărcare cele patru variante din fig. 3.9. Cele mai răspândite sînt construcțiile după schemele din fig. 3.9, *a* (mașină cu epruvetă în consolă) și 3.9, *c* (mașină cu epruvetă solicitată la încovoiere pură). La toate aceste scheme forțele P se aplică prin intermediul unor rulmenți.

a. Mașină cu epruvete rotative în consolă, încărcate prin sarcină constantă. Mașinile de acest tip — cele mai răspândite — funcționează după schema din fig. 3.10. Pe schiță se observă greutatea P notată cu 1, rulmenții 2 de transmitere a sarcinii, epruvetele 3, arborele de antrenare 4, pus în mișcare de roata 6 și lagărele 5. În plus (nefigurată pe desen), mașina are contoare de ture, înregistrînd numărul de cicluri pînă la ruperea epruvetei. În fig. 3.11 se arată vederea mașinii de acest tip, cu patru epruvete, realizată

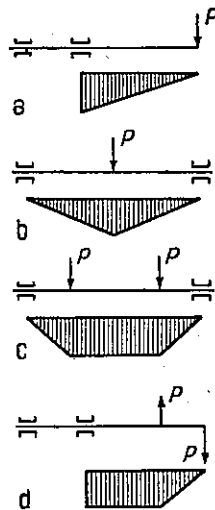


Fig. 3.9.

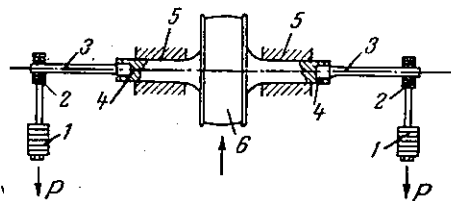


Fig. 3.10.

la Laboratorul de rezistența materialelor al Institutului Politehnic din București. Contoarele de ture sînt legate elastic cu capătul din rulment al epruvetei și ele se opresc o dată cu ruperea epruvetei. Dispozitivul de suspendare a greutăților are o serie de contacte electrice, în paralel, care se deschid o dată cu ruperea epruvetei; în acest fel, la ruperea ultimei epruvete, motorul ce antrenează mașina se oprește. Mașini similare s-au mai construit la noi în țară la Baza Academiei R.P.R. Timișoara, Institutul Politehnic Brașov, Uzinele Metalurgice Cugir. Există diverse variante ale acestor mașini, după numărul de epruvete încercate simultan, după modul de transmitere a sarcinii (transmitere directă, amplificare prin pîrghii, încărcare prin arc elicoidal) etc.

b. Mașină cu epruvetă rotativă, solicitată la încovoiere pură, încărcată prin sarcină constantă. Mașinilor în consolă li se aduce, ca principală critică, aceea a variației momentului încovoietor în

lungul epruvetei (fig. 3.9, *a*) ceea ce face ca ruperea să aibă loc în apropierea punctului de încastrare, unde starea de solicitare este complexă. Ca remediu, de multe ori epruvetele în consolă au o gîtuitură, care localizează ruperea într-un punct mai îndepărtat

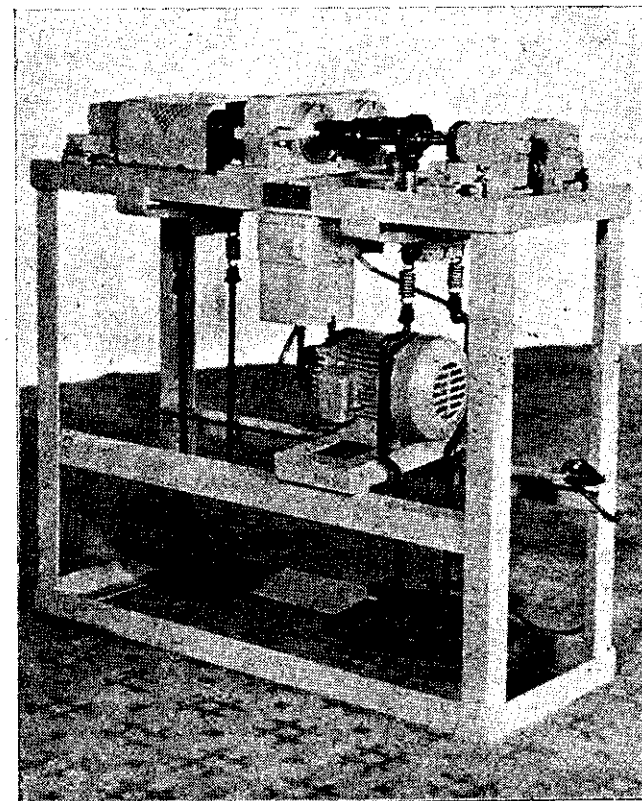


Fig. 3.11.

de încastrare și bine precizat. O soluție mai avantajoasă, din acest punct de vedere, o prezintă mașina cu epruvetă solicitată la încovoiere pură, arătată schematic în fig. 3.12. Mașina are axele 2, care au la capete fălcile de prindere a epruvetei 1, arborele de antrenare 3, motorul electric 4, lagărele 5, tijele de suspensie 6, talerele 7, pe care se așază greutatea 8 și contorul de ture 9. Mașina realizează schema de încărcare din fig. 3.9, *c*.

c. Mașină cu încărcare prin mecanism bielă-manivelă. La mașina DVL, fig. 3.13 [71], epruveta 1 are un capăt fixat de pîrghia 2, care poate oscila în lagărele 3, fiind pusă în mișcare de mecanismul bielă-manivelă 6 și 7; al doilea capăt al epruvetei este fixat de pîrghia 4, solidară cu dinamometrul 5. Încărcarea statică este realizată prin arc, iar cea dinamică prin mecanismul bielă-manivelă.

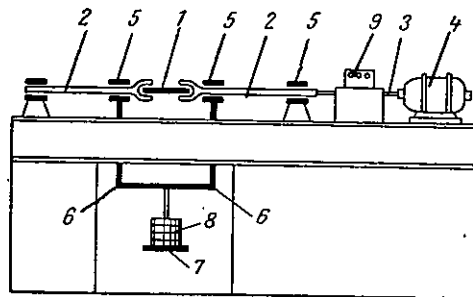


Fig. 3.12.

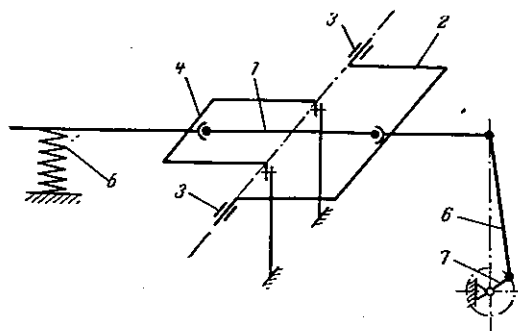


Fig. 3.13.

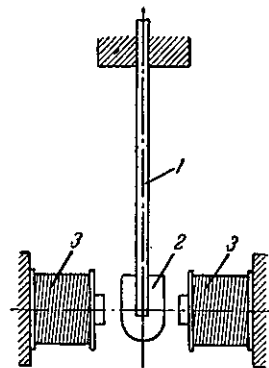


Fig. 3.14.

d. Mașină cu acționare electromagnetică pentru încercat la încovoiere plană. La mașina schematizată în fig. 3.14, sistemul oscilant format din epruveta 1 și piesa 2 este pus în mișcare oscilatorie de electromagneții 3.

3.1.2.4. Mașini pentru încercări la solicitări compuse

În ultima vreme, încercările de oboseală la diferitele feluri de solicitări compuse au luat dezvoltare din ce în ce mai mare. Un exemplu de mașină, realizând solicitări ciclice de încovoiere și răsucire, este mașina Gough-Pollard, schematizată în fig. 3.15. Solicitarea variabilă este cauzată de discul 1, pe care se află masa rotativă excentrică 2. Axul acestui disc se rotește în rulmentul 3,

fiind pus în mișcare de motorul electric 4, prin cureaua 5. Rulmentul este rezemat elastic pe piesa 6 prin intermediul arcului 7. Piesa 6 este solidară cu tija 8, iar aceasta transmite mișcarea la pîrghia de încărcare 9. Epruveta 11 este prinsă cu un capăt în falca 10, solidară cu pîrghia 9, iar cu celălalt în suportul fix 12. Amplitudinea deplasării epruvetei poate fi citită prin microscopul 13.

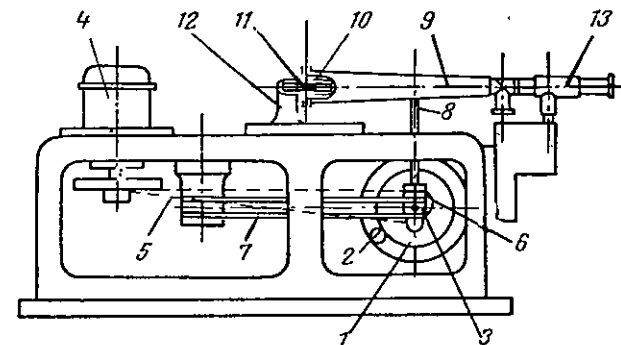


Fig. 3.15.

Rotind suportul 12 în diferite poziții, se poate realiza solicitarea de încovoiere (cînd axul epruvetei coincide cu al tije 9), de răsucire (cînd axele sînt perpendiculare) sau solicitarea simultană de încovoiere și răsucire (dacă axele fac un unghi oarecare). Mașina, cu epruvetă de dimensiuni stabilite, poate produce eforturi unitare de încovoiere pînă la 100 kgf/mm² și de răsucire pînă la 50 kgf/mm², lucrînd cu o frecvență de 25 Hz.

Alte mașini sînt descrise în lucrările [67], [71].

3.1.2.5. Mașini de încercat universale

Se înțeleg, sub acest nume, mașinile care pot executa, în diferite montaje, încercări variate (de întindere-compresiune, încovoiere, răsucire). Privite astfel, mașinile din fig. 3.8 și 3.15 sînt tot mașini universale.

O mașină din această categorie, putînd executa încercări de întindere, compresiune, întindere-compresiune, încovoiere, răsucire, este *vibroforul* Amsler. Pe schema din fig. 3.16 se observă greutatea reglabilă 1, prin adăugarea sau scăderea de greutatea fracționare, masa fundației 2; considerată infinită, epruveta 3 în montaj de încercare la întindere, dinamometrul 4, măsurînd forța pe cale optică, arcul inelar 5, pentru aplicarea forței statice

inițiale, de întindere sau compresiune, șurubul 6 de comandă a arcului 5, amortizoarele de trepidații 7 sub fundație, sursa de lumină și lentile 8, scala dinamometrică 9 pentru măsurarea forței, ecranul cu fantă 10, celula fotoelectrică 11 comandând dispozitivul electronic, suportul 12 al celei fotoelectrice, generatorul de impulsuri electrice 13, electromagnetul 14 pentru întreținerea impulsurilor, amplificatorul electronic 15, suportul cu oglinzi 16, lama de comparație a dinamometrului și falca de prindere 18 a epruvetei.

Vibroforul lucrează pe principiul rezonanței unui sistem oscilant, realizată prin electromagnet. Sistemul oscilant este format din masa 2, infinită, și masa 1, cuplate elastic prin epruveta 3.

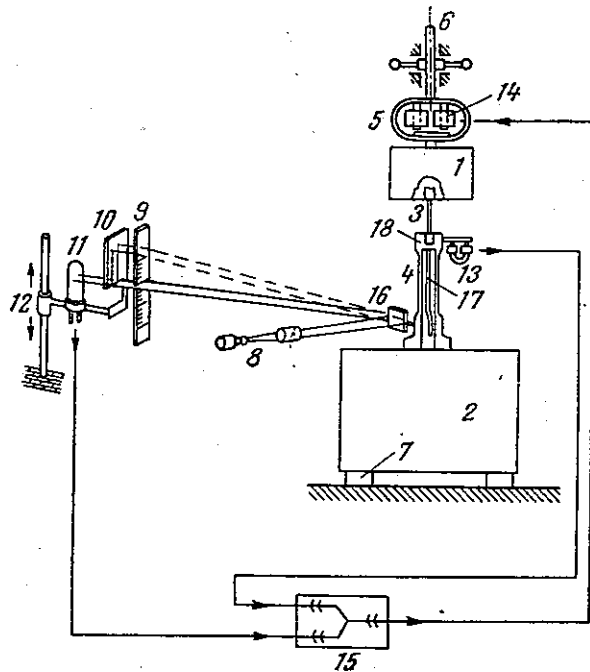


Fig. 3.16.

Schimbând epruveta și masa 1, se realizează diverse frecvențe proprii, care trebuie să coincidă cu frecvența impusă de electromagnet. Generatorul de vibrații este de tip electronic și excitarea lui se face chiar de către mașină. O rază luminoasă provenind de la sursa 8, reflectată pe oglinda 16, cade pe ecranul 10 și măsoară

forța aplicată epruvetei. În repaus, devierea razei măsoară sarcina statică aplicată epruvetei; în timpul funcționării, lungimea dungii luminoase de pe ecran dă sarcinile maximă și minimă aplicate epruvetei. Aplicând sau nu o sarcină inițială, prin arc 5 se pot exercita asupra epruvetei cicluri asimetrice sau simetrice. Un dispozitiv de reglare electronic, format din piesele 11—15 menține constante cele două limite ale sarcinii, în timpul funcționării. Un contor măsoară numărul de cicluri, precum și frecvența de lucru. Un releu poate opri mașina, fie la apariția primei fisuri — înainte de rupere, fie după ruperea epruvetei. La vibroforul de 2 tf, vibrațiile sonore nu sînt supărătoare. Dimpotrivă, cel de 10 tf dă zgomote puternice și trebuie instalat într-o cameră izolată fonic. Mașina are și cuptor pentru încercări la cald, ca și frigider pentru încercări la temperaturi joase. Oprind acționarea mașinii și înregistrînd vibrațiile ei libere pînă la oprire, se pot studia și proprietățile de amortizare ale materialului epruvetei.

O mașină universală, lucrînd de asemenea pe principiul rezonanței, a fost construită la Institutul Bauman din Moscova; ea este descrisă în lucrările [57], [71].

3.1.2.6. Mașina de încercat după program

Tehnica modernă a dus la construirea de mașini de încercat la oboseală, prin cicluri nestaționare, variînd după program. În acest fel se caută a se realiza moduri de solicitare cît mai apro-

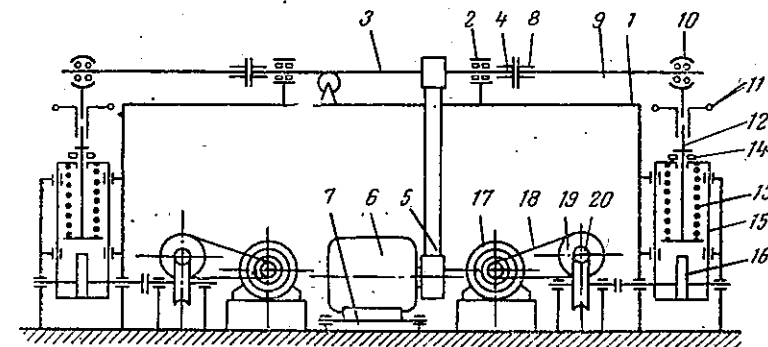


Fig. 3.17.

priate de cele întîlnite în construcțiile de mașini. O mașină de încercat după program, pentru două epruvete solicitate la încoviere rotativă în consolă, este arătată în fig. 3.17 [71]. Mașina este formată din cadrul 1, rulmenții 2, fixați pe cadrul 1, arborele

principal 3, cuplajele 4, cureaua de acționare 5 a arborelui principal, motorul electric 6, placa de fundație 7, fălcile de prindere 8 a epruvetelor 9, rulmentul 10 de aplicare a sarcinii, volantul 11 pentru aplicarea sarcinii, tijă comprimată 12 și arcul 13, care transmit sarcina la epruvetă; piesele 14 și 15 de rezemare a arcului, excentricul 16 a cărui rotire deplasează cadrul 15 și modifică forța aplicată de arc, dispozitivul de mișcare a excentricului, format din motorul electric 17, cureaua 18, roata de curea 19, mecanismul cu melc 20. Durata de aplicare a diverselor sarcini și mărirea lor se pot varia prin cama 16 și dispozitivul de comandă al ei 17—20.

3.1.2.7. Mașini pentru încercări în mediu corosiv

În general, prin adaptarea unor vase speciale, mașinile obișnuite pot fi transformate în mașini lucrând în mediu lichid corosiv. De asemenea, se pot transforma în mașini de încercat la temperaturi ridicate [6] sau la temperaturi joase. Un exemplu de astfel de mașină este mașina LK-2, arătată schematic în fig. 3.18. Epruveta 1, încăstrată la capătul de jos, se află în vasul 2, care este plin cu lichidul corosiv, sau cu un mediu refrigerent. Epruveta nu se rotește. Solicitarea de oboseală prin încovoiere este produsă de motorul electric 3, care, prin axul 4 și furca 5, pune în mișcare de rotație piesa 6, rezemată prin rulment pe capătul epruvetei. Greutățile 7 din capătul piesei 6, fiind neechilibrate, produc asupra epruvetei o forță de inerție rotitoare, care dă solicitare la oboseală de aceeași natură cu cea produsă de mașina din fig. 3.10.

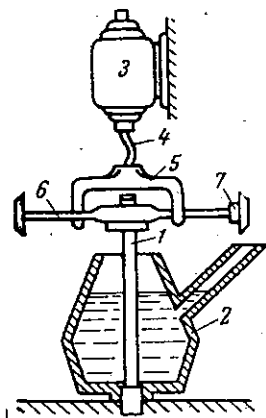


Fig. 3.18.

3.1.2.8. Mașini pentru încercat la oboseală piese de mașini

În fabricația de mașini de serie, este foarte important a cunoaște proprietățile de oboseală ale pieselor de mașini încercate în stare naturală. În acest scop, se construiesc mașini speciale pentru încercat arcuri de foi, arcuri elicoidale (de supape), arbori cotiți. Mai mult, se construiesc chiar standuri vibratoare care

încearcă la oboseală mașinile în ansamblu, cum ar fi autovehiculele. Așa, spre exemplu, în fig. 3.19 se arată schema unei mașini pentru încercat arcuri de autovehicule, mașină care are un reazem rigid, 2, un disc, 3, cu excentric, 4, o bielă, 5, o tijă de comandă, 6, un dinamometru, 7, care servește la măsurarea forței și la variația forței statice și un motor electric, 8. Arcul de încercat este notat cu 1.

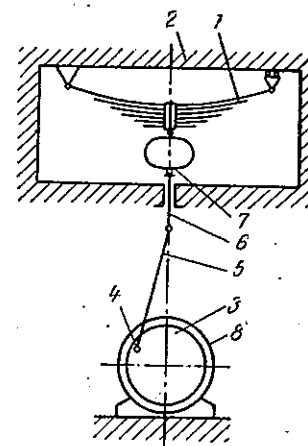


Fig. 3.19.

3.2. EPRUVETE PENTRU ÎNCERCĂRI LA OBOSEALA

Pentru încercări de încovoiere rotativă, formele epruvetelor sînt precizate în STAS 5878-58: epruvetele din fig. 3.20, a și b sînt pentru încercări în consolă, iar cea din fig. 3.20, c pentru încercare prin încovoiere pură. Mașinile de încercat de la Laboratorul de rezistența materialelor de la Institutul Politehnic București, ca și cele de la Baza Academiei R.P.R. Timișoara, de tip în consolă, folosesc în special epruvete de modelul din fig. 3.20, b. La epruvetele din fig. 3.20, a și b, lungimea brațului momentului s-a ales astfel ca valoarea numerică a forței aplicate, măsurată în kilograme, să fie egală cu valoarea efortului unitar în secțiunea de solicitare, măsurată în kgf/mm^2 . În acest fel, calculul este redus la minimum. Mașinile de la Institutul Politehnic București, construite anterior apariției standardului, folosesc epruvete avînd dimensiunile din fig. 3.21. Prelucrarea epruvetelor trebuie făcută foarte îngrijit, conform unui plan de operații stabilit. Ea comportă o eboșare prin strunjire, o finisare prin strunjire și o netezire longitudinală — manuală sau mecanică — cu hîrtie abrazivă sau praf abraziv. Conform STAS 5878-58, adaosul de netezire va fi de cel puțin 0,1 mm. Netezirea se execută în trei trepte, cu abrazive de finețe progresivă, granulația fiind cel puțin HCS 100(000) STAS 1581-61. După ultima prelucrare să nu existe urme de zgîrieturi vizibile cu ochiul liber. După prelucrare, epruvetele se acoperă cu vaselină tehnică.

Dimensiunile epruvetelor, neprecizate în fig. 3.20, se aleg în funcție de mașina de încercat. În GOST 2860-45 [41] se dau epruvetele standardizate sovietice, cu și fără creștături, pentru solicitări de încovoiere.

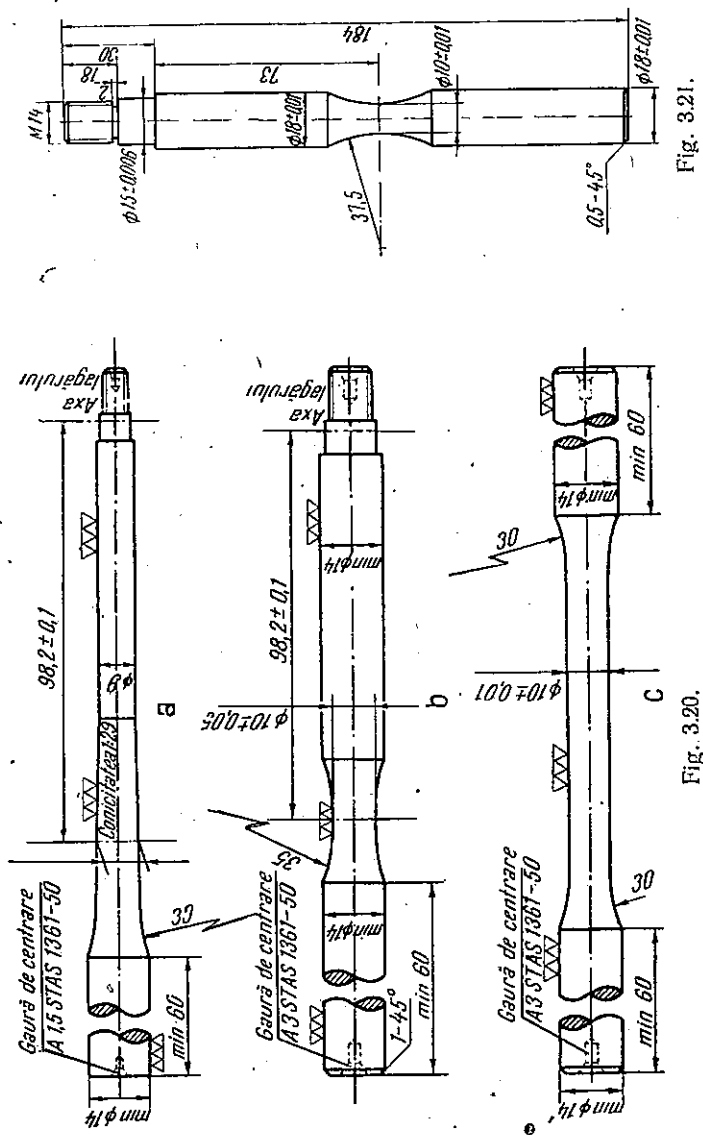


Fig. 3.21.

Fig. 3.20.

În fig. 3.22 se arată diferite tipuri de epruvete pentru încercări de răsucire, iar în fig. 3.23 pentru încercări de întindere-compreziune [41]. În lucrarea [34] se indică forme de epruvete pentru încercarea la oboseală a fontei; în lucrările [2], [61] pentru încercările sudurilor; în lucrarea [6] pentru încercări de oboseală la temperaturi înalte.

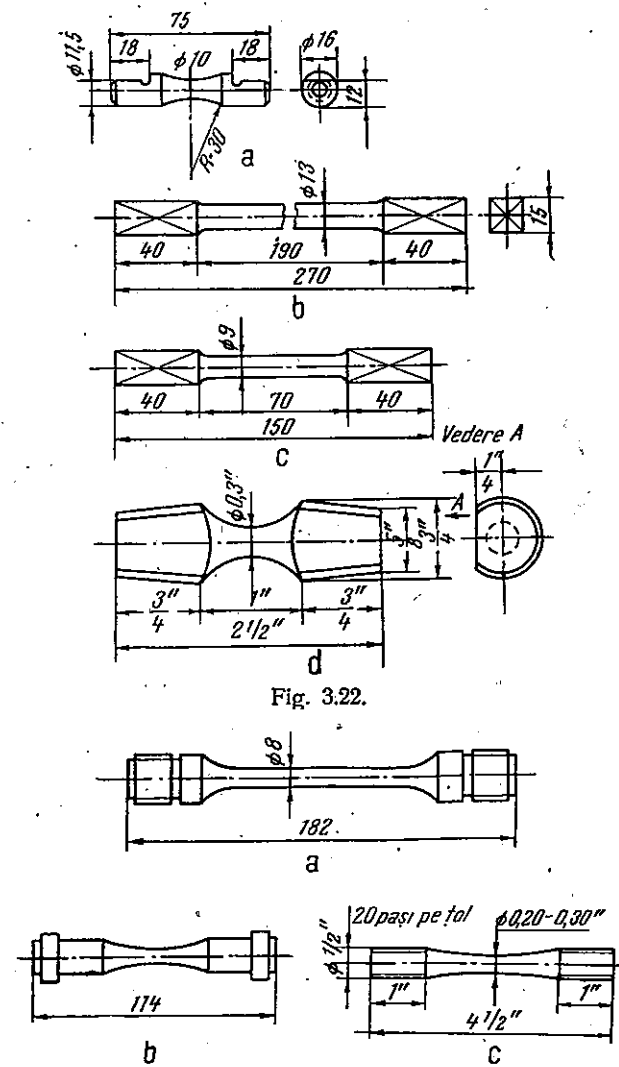


Fig. 3.22.

Fig. 3.23.

3.3. METODE DE INCERCARE LA OBOSEALA. CONSTRUIREA CURBEI DE OBOSEALA

3.3.1. Executarea încercării

La executarea încercării la oboseală se folosesc cel puțin opt epruvete identice, luate din același lot de material. Prima epruvetă se încercă la cicluri avînd un efort unitar maxim destul de ridicat. În STAS 5878-58 se prevede a se încărca prima epruvetă după cum urmează :

- pentru oțeluri $\sigma_{max} = 0,6 \sigma_r$;
- pentru aliaje neferoase ușoare $\sigma_{max} = 0,4 \sigma_r$.

La epruvetele următoare, efortul unitar maxim se micșorează față de precedenta, cu 1—2 kgf/mm². Se observă că, în timpul încercării unei epruvete, limitele σ_{max} , σ_{min} trebuie să rămîna ne schimbate.

Există mai multe metode de schimbare a mărimii ciclului, la trecerea de la o epruvetă la alta :

- se menține pentru toate epruvetele același efort unitar mediu σ_m (la încercarea prin ciclu simetric $\sigma_m = 0$);
- se menține aceeași limită inferioară σ_{min} , variind de la o epruvetă la alta, pe σ_{max} ; metoda este indicată în special pentru încercări prin ciclu pulsator, la care $\sigma_{min} = 0$, sau adeseori σ_{min} are o valoare minimală, diferită de zero, spre a asigura prinderea epruvetei în fălci.

La fiecare epruvetă se notează efortul unitar maxim și numărul de cicluri după care s-a rupt. Încercarea este reușită dacă, micșorînd mereu pe σ_{max} , se ajunge ca cel puțin o epruvetă să nu se mai rupă, chiar după un număr foarte mare de cicluri. Se stabilește, convențional, numărul de cicluri de bază N_B pînă la care se continuă încercarea epruvetelor care nu se rup : de obicei $10 \cdot 10^6$ pentru oțeluri și $20 \cdot 10^6 \dots 100 \cdot 10^6$ pentru aliaje ușoare.

Pentru stabilirea cît mai apropiată a rezistenței la oboseală, după epruveta care nu s-a rupt, este bine a se încerca încă una, la un efort unitar σ_{max} superior cu 0,5—1 kgf/mm² celui al epruvetei nerupte. Dacă nici această epruvetă nu se rupe, atunci ea determină valoarea rezistenței la oboseală; contrar, rezultatul experienței este dat de cea anterioară. Durata încercării poate fi scurtată, la determinări aproximative, pînă la $2 \cdot 10^6$ pentru oțeluri și $10 \cdot 10^6$ pentru aliaje ușoare. Pentru încercarea betonului și a construcțiilor de beton, se ia $N_B = 2 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ cicluri; pentru lemn — $N_B = 5 \cdot 10^6$ cicluri.

La mașinile de încercat la oboseală prin încovoiere rotativă, care aplică epruvetelor numai cicluri simetrice de solicitare, se pot executa și încercări prin ciclu asimetric, dacă se montează pe epruvetă un arc, care produce o solicitare inițială statică σ_m :

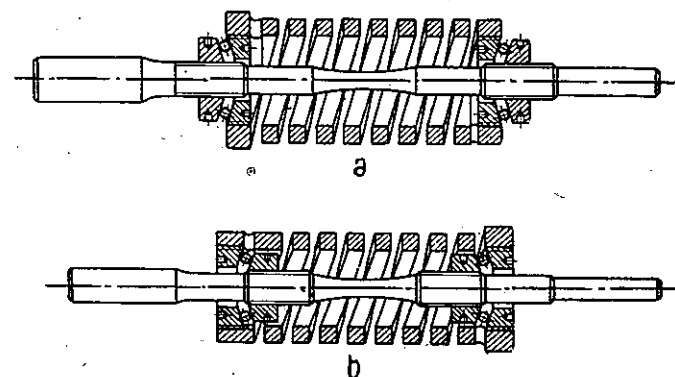


Fig. 3.24.

arcul montat comprimat (fig. 3.24, a) produce $\sigma_m > 0$, iar cel montat întins (fig. 3.24, b) dă un efort unitar de compresiune, $\sigma_m < 0$ [57].

3.3.2. Construirea curbei de oboseală. Rezistența la oboseală

Pe baza datelor experimentale se construiește curba lui Wöhler, fie în coordonate $\sigma_{max} \cdot N$ (fig. 2.1), fie în coordonate semilogaritmice (fig. 2.3). În fig. 3.25 se dă, ca exemplu, curba de oboseală

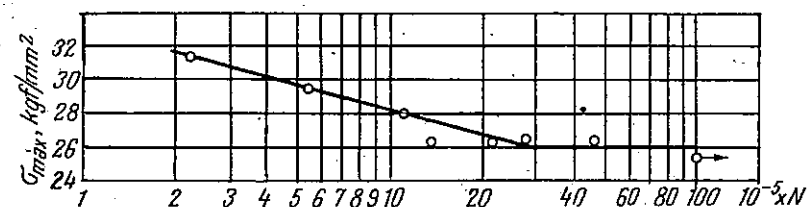


Fig. 3.25.

pentru un oțel carbon, avînd $\sigma_{-1} = 2600$ kgf/cm², construită în coordonate semilogaritmice. Pe desen se reprezintă prin puncte epruvetele care s-au rupt și cu semnul O→ cele care nu s-au rupt, fiind încercate pînă la numărul de cicluri convențional. Diagrama

se trasează printru puncte și are forma unei linii frânte, sau a două linii drepte racordate între ele.

În fig. 3.26 este reprezentată curba de oboseală pentru titan tehnic [57] avînd $\sigma_{-1} = 2700 \text{ kgf/cm}^2$; încercările au fost conduse pînă la 10^8 cicluri.

Este cunoscut faptul că rezultatele încercărilor la oboseală prezintă o mare dispersie și că adeseori este destul de dificil a

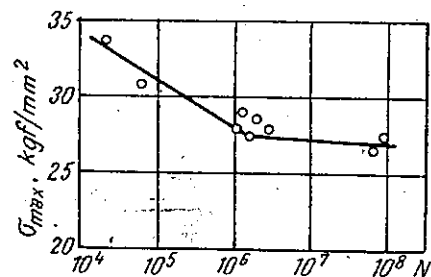


Fig. 3.26.

trasa curba de oboseală, pe baza unui număr de 8—10 epruvete încercate. De aceea, la încercări mai îngrijite, se folosește un număr mai mare de epruvete, iar cu punctele obținute se trasează o curbă superioară și una inferioară; evident, se consideră rezistența la oboseală asimptota curbei inferioare.

Pentru cercetări științifice [15], [46], [47] se încearcă un număr mult mai mare de epruvete, câteva sute, iar rezultatele sînt prelucrate prin metodele statisticii matematice, spre a construi curba de oboseală.

La încercarea de oboseală a unui material, în laborator, se întocmește un buletin, în care se înscrie, conform STAS 5878-58:

- caracteristicile materialului din care s-au luat epruvetele: proprietăți mecanice statice, semifabricatul, tratamentul termic, șarja etc.;
- forma epruvetei și condițiile ei de prelucrare;
- caracteristicile mașinii de încercat: schema de încărcare și frecvența de solicitare;
- rezistența la oboseală;
- informativ, curba lui Wöhler.

Pentru rezistențele la oboseală prin ciclu simetric sau pulsator, se folosesc simbolurile curente σ_{-1} , σ_0 . Pentru alte încercări prin cicluri asimetrice, rezistența la oboseală se dă fie sub forma unei cifre unice

$$\sigma_{-0,273} = 22 \text{ kgf/mm}^2,$$

fie sub forma unei sume între efortul unitar mediu și amplitudinea ciclului

$$\sigma_{-0,273} = +8 \pm 14 \text{ kgf/mm}^2.$$

3.3.3. Încercări la oboseală după program

În afara încercării la oboseală clasică, descrisă mai înainte, se mai practică diferite încercări, după anumite programe, în scopul cunoașterii comportării la oboseală a pieselor în condiții de exploatare. Astfel, la o fabricație îngrijită de motoare, se supun arcurile de supape și bielele unor încercări de oboseală (de exemplu la $N \geq 2 \cdot 10^6$ cicluri) spre a elimina cele cu defecte care ar putea periclita motoarele. Alături, se fac încercări obișnuite de oboseală, pe loturi de piese; fabricația omogenă trebuie să dea practic aceeași rezistență de oboseală la fiecare lot. Se mai obișnuiește a se face încercări la oboseală ale „punctelor slabe” ale mașinilor (anumite buloane, tije etc.) spre a cunoaște mărirea sarcinilor la care ele se vor rupe.

Pentru piese folosite în construcția avioanelor, se fac încercări după program, schimbînd caracteristicile ciclurilor, după anumite durate, așa ca să se reproducă în mod cît mai fidel condițiile reale de exploatare [87].

3.3.4. Încercările materialelor plastice

Dezvoltarea mare a materialelor plastice și introducerea lor pe scară largă în construcția de mașini face necesară încercarea lor la oboseală. Lucrarea [85] se ocupă special cu această problemă. Date fiind relațiile neliniare între eforturile unitare și deformății, precum și proprietățile accentuate de fluaj ale acestor materiale, încercările de oboseală necesită o metodică specială, în care să se țină seamă și de factorul deformație. Ca urmare, s-au stabilit patru clase de încercări la oboseală, arătate prin desenele din fig. 3.27, și anume:

a. Clasa A de oboseală, fig. 3.27, a: deformățiile variază între limite constante, pe cînd eforturile unitare scad în timp.

b. Clasa B de oboseală, fig. 3.27, b: valoarea medie a efortului unitar rămîne constantă, amplitudinea micșorîndu-se mereu, iar deformățiile cresc în timp;

c. Clasa C de oboseală, fig. 3.27, c: eforturile unitare variază între limite constante, pe cînd deformățiile cresc mereu, ca amplitudine și valoare medie.

d. Clasa D de oboseală, fig. 3.27, d: valoarea medie a deformațiilor rămîne constantă, amplitudinile crescînd; valoarea medie

a eforturilor unitare scade mereu, pe cînd amplitudinile rămîn constante.

În lucrarea citată se dau indicații asupra încercării cauciucului și a diversilor polimeri sintetici la oboseală.

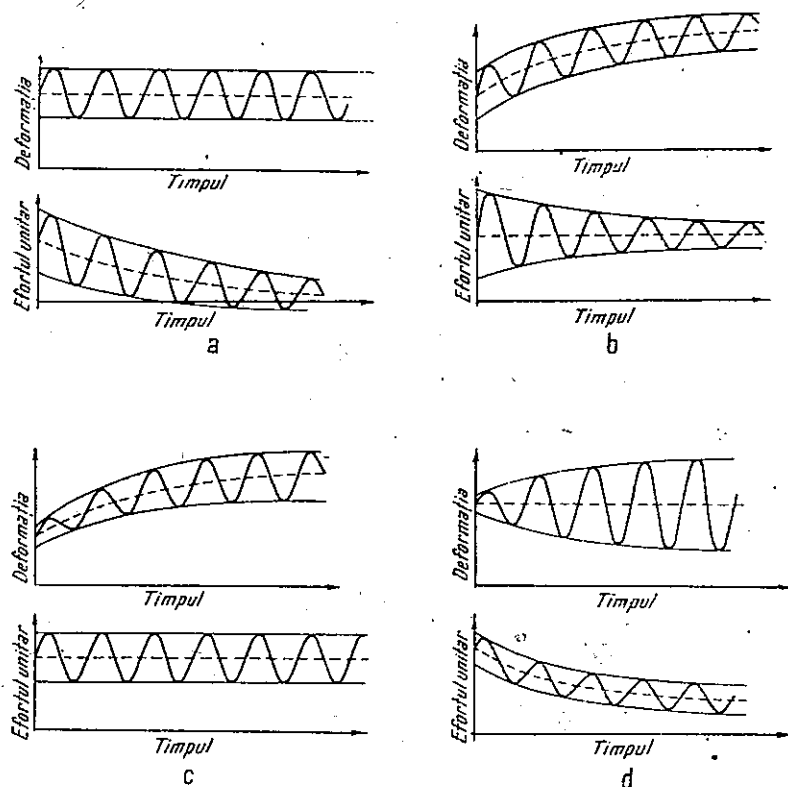


Fig. 3.27.

3.3.5. Încercări de oboseală la solicitări compuse

Încercările de oboseală la solicitări compuse au rolul să arate comportarea materialelor la stări de solicitare mai apropiate de cele reale din tehnică. Aici există o gamă foarte largă de cazuri posibile, după natura solicitărilor aplicate simultan — încovoiere și răsucire variabile, întindere-compresiune și răsucire variabile, încovoiere variabilă și răsucire statică etc. — după cum ciclurile

sînt simetrice sau asimetrice, după cum solicitările ciclice sînt în fază sau defazate etc. În această gamă largă de posibilități s-au executat pînă în prezent încercări numai la unele cazuri particulare, cîmpul de cercetare fiind încă deschis.

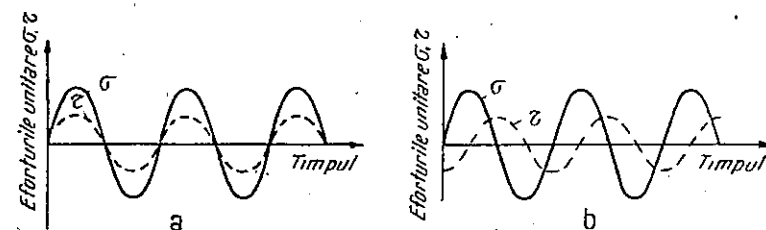


Fig. 3.28.

Printre primele încercări se numără cele efectuate asupra oțelurilor, solicitate prin cicluri simetrice de încovoiere și răsucire. Solicitățile date de cele două feluri de cicluri pot varia în fază, fig. 3.28, *a*, defazat cu 90°, fig. 3.28, *b*, sau cu un defazaj oarecare. Metodica de încercare este similară celei arătată anterior, la solicitări simple. Se presupune că este vorba de cicluri lucrînd în fază. Pentru o primă serie de 8—10 epruvete, se stabilește un anumit raport între $\sigma_{max} = \sigma_v$ și $\tau_{max} = \tau_v$ și se încearcă epruvetele, succesiv, micșorînd pe σ_{max} , τ_{max} la trecerea de la una la alta, dar menținînd constant raportul lor. Cînd s-a ajuns la ultima epruvetă, care nu se mai rupe, s-a obținut o *rezistență la oboseală la solicitări compuse*, respectiv un punct al unei diagrame în sistemul de axe σ_v , τ_v . Pentru alte serii de epruvete, se schimbă raportul σ_v/τ_v , obținînd alte puncte în planul axelor σ_v , τ_v . Cazurile extreme vor fi $\sigma_v \neq 0$, $\tau_v = 0$ și $\tau_v \neq 0$, $\sigma_v = 0$, care reproduc încercările la solicitări simple de încovoiere, respectiv răsucire.

Încercările făcute de Gough și Pollard, pe un oțel aliat, supus la solicitări simetrice prin cicluri în fază, au dus la rezultatele înscrise pe fig. 3.29. Aceste rezultate trebuie analizate prin prisma teoriilor de rupere. Astfel, cu ajutorul punctelor înscrise pe desen se poate trasa o elipsă, de ecuație

$$\left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1, \quad (3.1)$$

în care σ_{-1} , τ_{-1} reprezintă semiaxele elipsei, măsurate pe axe de coordonate, iar σ_L , τ_L coordonatele unui punct oarecare de pe elipsă, care este *curba ciclurilor limită*. Coordonatele σ_L , τ_L sînt perechile de valori care dau rezistența la oboseală la

solicitări compuse, determinate în modul descris mai înainte. Elipsa reprezentată de ecuația (3.1) corespunde teoriei de rupere a efortului unitar tangențial maxim.

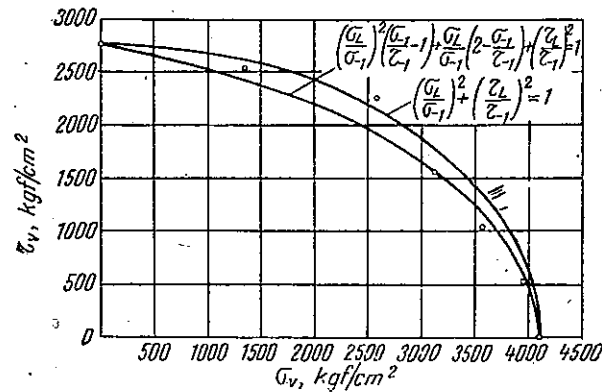


Fig. 3.29.

Dat fiind că ruperea prin oboseală are, chiar și la metale tenace, caracterul unei rupei fragile, dacă se aplică teoria efortului unitar principal maxim se ajunge la ecuația elipsei

$$\left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{-1}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_L} - 1\right) + \frac{\sigma_L}{\sigma_{-1}} \left(2 - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_L}\right) + \left(\frac{\tau_L}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1. \quad (3.2)$$

Ambele elipse, destul de apropiate între ele, au fost reprezentate pe fig. 3.29.

Încercări făcute cu cicluri simetrice defazate cu 90° (fig. 3.28, b) au arătat că cele două solicitări, neavînd maximele simultane, nu se mai influențează și ca urmare curba ciclurilor limită de solicitări compuse se transformă într-un dreptunghi (fig. 3.30) [25]. Dacă defazajul între cele două solicitări simetrice are alte valori, atunci

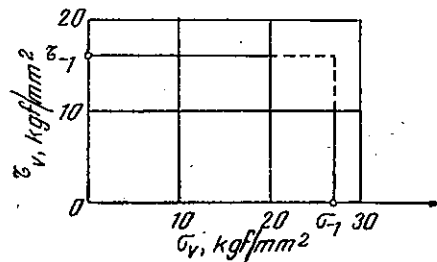


Fig. 3.30.

atunci curbele ciclurilor limită se înscriu între dreptunghi și elipsă.

La o fontă aliată cu crom și cupru, încercările făcute de Gough și Pollard au dus la construirea diagramei din fig. 3.31, corespunzînd de asemenea ecuației (3.2).

Încercări făcute de Gough asupra unui oțel crom-nichel, supus la solicitări prin cicluri simetrice și asimetrice, în fază, au dus la rezultatele înscrise pe fig. 3.32. Se observă că rezistențele

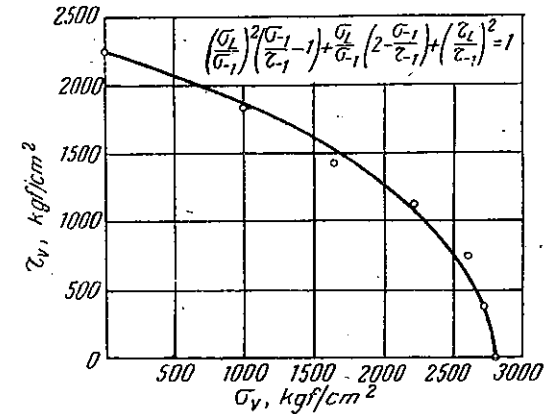


Fig. 3.31.

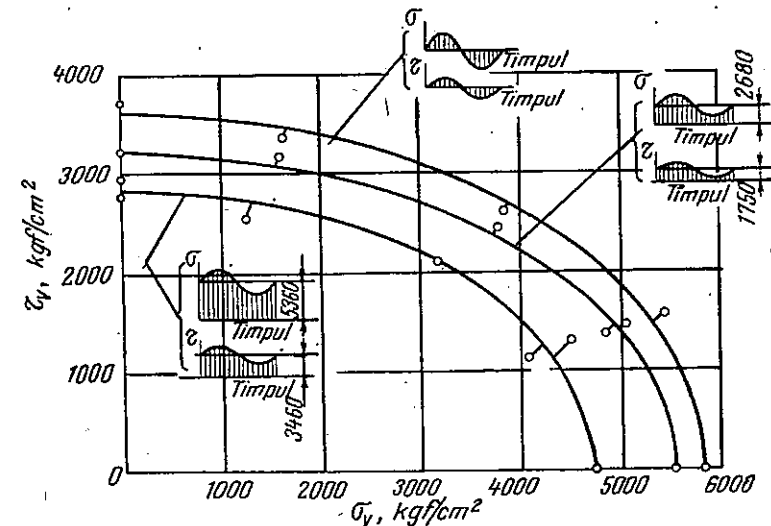


Fig. 3.32.

cele mai mari se obțin la cicluri simetrice și că ele scad pe măsură ce crește σ_m , τ_m . De notat că pe axele de coordonate ale diagramei s-au înscris amplitudinile σ_v , τ_v ale ciclurilor.

Încercări făcute la solicitări ciclice simetrice, simultane cu solicitări statice [67] arată că rezistențele la oboseală se micșorează astfel:

— pentru încovoiere simetrică, cu răsucire statică

$$(\sigma_{-1})_r = \sigma_{-1} - a\tau_{st}; \quad (3.3)$$

— pentru răsucire simetrică, cu încovoiere statică

$$(\tau_{-1})_s = \tau_{-1} - b\sigma_{st}, \quad (3.4)$$

unde s-au notat: $(\sigma_{-1})_r$, $(\tau_{-1})_s$ — rezistențele la oboseală prin cicluri simetrice de încovoiere, respectiv răsucire, în prezența unei solicitări statice de răsucire, respectiv încovoiere, iar τ_{st} , σ_{st} — eforturile unitare statice.

Pentru oțelurile cercetate de Sceglov, coeficienții a și b au valorile:

$$a = 0,00 \dots 0,15;$$

$$b = 0,07 \dots 0,18.$$

În lucrările [15], [44], [57] se găsesc numeroase date asupra rezistențelor la oboseală în cazul solicitărilor compuse.

3.4. METODE RAPIDE DE ÎNCERCARE LA OBOSEALA

Dificultatea principală a încercărilor la oboseală, prin metoda Wöhler, constă în aceea că ele necesită un timp lung de experimentare. Această durată se poate scurta încercând simultan epruvete la mai multe mașini. Ca un corectiv al acestei dificultăți, numeroși cercetători au căutat să stabilească metode prescurtate de experimentare, fie folosind altă metodă de aplicare a sarcinilor, fie căutând corelații între rezistența la oboseală și alte proprietăți fizice ale materialelor. Deși pînă în prezent metoda clasică rămîne cea mai sigură, aceste metode prescurtate nu sînt lipsite de interes; se va face o scurtă prezentare a unora dintre ele.

a. În metoda Prot, sau metoda sarcinii progresive, fiecare epruvetă se încercă la sarcină ciclică progresivă, adică mărită în trepte. Acest lucru se realizează la o mașină de încercat care, la anumite intervale (de exemplu 1 000 cicluri, 10 000 cicluri etc.) lasă să cadă alice într-un vas, suspendat de capătul epruvetei rotitoare, mărind astfel efortul unitar maxim al ciclului, pînă se realizează ruperea. Pentru o epruvetă încercată, se notează viteza de creștere a sarcinii, α , măsurată în $\text{kgf/mm}^2/\text{ciclu}$ și efortul unitar maxim al ciclului, cînd s-a produs ruperea epruvetei, $\sigma_{max\ r}$. Pentru alte epruvete, se modifică viteza de încărcare, α , obținînd altă valoare pentru $\sigma_{max\ r}$. Pornind de la observația că curba lui

Wöhler, determinată pe calea clasică, în coordonate σ_{max} , N , este o hiperbolă echilaterală, se ajunge la concluzia că relația $\sigma_{max\ r} - \alpha$ în coordonate semilogaritmice, este o linie dreaptă, dacă pentru α se ia rădăcina pătrată a vitezei de încărcare. Dat fiind că curba lui Wöhler nu este totdeauna hiperbolă de gradul al doilea, ci de grad superior, se obișnuiește a se reprezenta relația $\sigma_{max} - \alpha$ și luînd în abscisă rădăcina cubică a vitezei de încărcare. Determinarea rezistenței la oboseală în metoda Prot constă în construi-

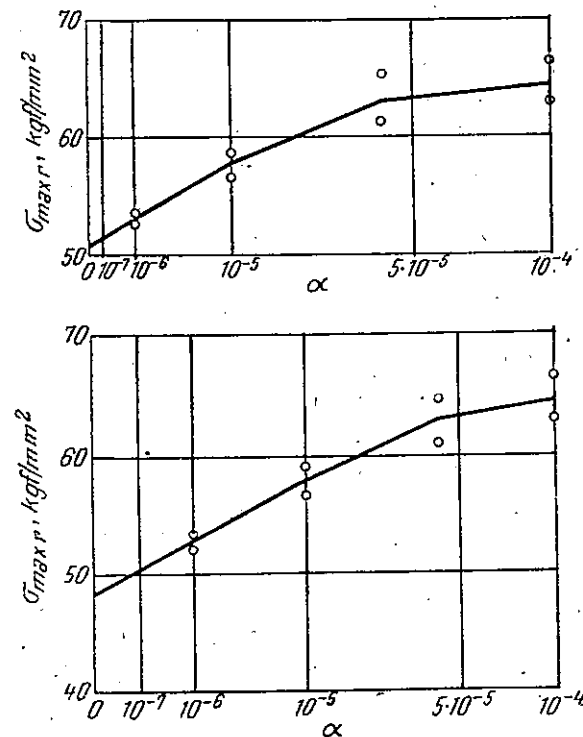


Fig. 3.33.

rea liniei drepte $\sigma_{max} - \alpha$, pe baza datelor experimentale și extrapolarea ei pînă la viteza nulă. Valoarea ordonatei $\sigma_{max\ r}$ pentru viteza de creștere a sarcinii nulă, deci pentru sarcină constantă, este rezistența la oboseală. În fig. 3.33 s-a reprezentat diagrama Prot pentru un oțel [15]. În figura de deasupra s-a luat rădăcina pătrată a vitezei de încărcare, iar în figura de jos, rădăcina cubică; rezistențele la oboseală obținute sînt 51, respectiv 48,5 kgf/mm^2 .

b. În metoda de încercare în trepte [J. T. Ransom] se evaluează de la început limitele maximă și minimă între care s-ar putea situa rezistența la oboseală căutată. Acest interval se împarte în trepte, iar prima epruvetă se încercă la valoarea mij-

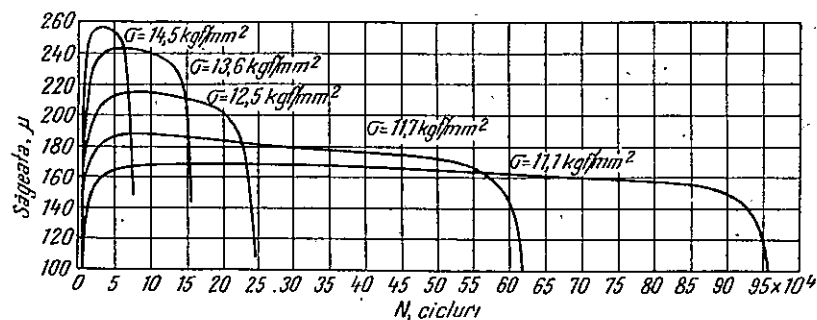


Fig. 3.34.

locie a intervalului. Dacă ea s-a rupt, epruveta următoare se încercă la treapta imediat inferioară. Dacă aceasta nu s-a rupt, epruveta ce urmează se încercă la treapta superioară etc. În acest fel, încercările se concentrează în jurul valorii medii și rezistența la oboseală se află mai repede decât la încercarea clasică. Rezultatele încercării, efectuată pe cel puțin 40 epruvete, sînt prelucrate pe bază statistică.

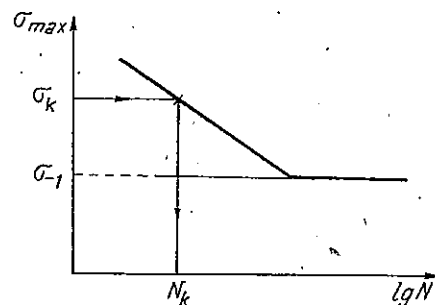


Fig. 3.35.

c. În metoda înregistrării diagramei de oboseală [82], [86] se urmăresc fazele de dezvoltare a procesului de rupere prin oboseală. În acest scop se înregistrează — prin aparate adaptate la mașina de încercat — variația săgeții epruvetei în funcție de numărul de cicluri. În fig. 3.34 se arată curbele obținute la încercarea unor epruvete de cupru, la diferite amplitudini ale ciclurilor. Curba deformațiilor prezintă trei faze: o fază ascendentă, una maximală, una descendentă. Faza maximală corespunde apariției fisurii de oboseală.

d. În metoda propusă de V. S. Ivanova [82] se definește, pe partea descendentă a curbei de oboseală (fig. 3.35), un punct

critic, căruia îi corespunde un număr critic de cicluri, N_k , și un efort unitar critic, σ_k , precum și o constantă ciclică a materialului, α . Cu ajutorul acestora, rezistențele la oboseală sînt date de relațiile

$$\sigma_{-1} = \sigma_k - \alpha \sigma; \quad \tau_{-1} = \tau_k - \alpha, \quad \text{cu } \alpha \approx 2\alpha. \quad (3.5)$$

În lucrarea [82] se arată metoda de determinare a acestor mărimi.

e. Alte metode rapide fac legătură între rezistența la oboseală și puterea consumată de mașina de încercat, sau temperatura epruvetei, histerezisul magnetic, curenții Foucault etc.

FACTORII DE CARE DEPINDE REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

Practica îndelungată a arătat că valoarea rezistenței la oboseală este funcție de o serie de factori, al căror efect trebuie luat în considerație la proiectare. Acești factori pot fi sistematizați astfel:

- a) materialul, structura lui, tehnologia semifabricatului;
- b) felul solicitării;
- c) asimetria ciclului;
- d) concentratorii de eforturi unitare;
- e) dimensiunile epruvetei;
- f) prelucrarea și starea suprafeței;
- g) acțiunea agenților corosivi;
- h) tensiunile remanente;
- i) temperatura;
- j) frecvența de aplicare a solicitării variabile;
- k) variația mărimii solicitării variabile.

Factorul material este evident. Se vor face unele considerații suplimentare asupra lui. Factorii enumerați la punctele b și c au fost examinați la cap. 2. Din examinarea celorlalți factori, care se va face în acest capitol, se vor trage concluzii asupra metodelor tehnologice și constructive pe care inginerul trebuie să le aplice pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală; acestea vor face obiectul capitolului 5 al lucrării.

Dintre factorii enumerați, unii au fost studiați mai bine, iar efectul lor cantitativ poate fi luat în considerare în calcule. Alții, mai puțin cercetați, vor fi luați în considerare numai în mod calitativ.

Rezistența la oboseală este un fenomen fizic complex, depinzând de ansamblul de factori enumerați. De aceea, examinarea efectului separat al fiecăruia este, uneori, destul de dificilă. În

general, în studiile efectuate, condițiile de experimentare diferă de la un cercetător la altul, fapt care nu permite o sistematizare elegantă a tuturor datelor de care se dispune în prezent.

4.1. MATERIALUL, STRUCTURA LUI, TEHNOLOGIA SEMIFABRICATULUI

Rezistența la oboseală depinde, în mare măsură, de existența incluziunilor nemetalice, a porilor și a oricăror defecte de material. Din acest motiv, elaborarea cât mai îngrijită a oțelurilor este de mare importanță pentru asigurarea unei rezistențe la oboseală mărite. Existența segregățiilor, în special de sulf, fosfor, are efect defavorabil.

Ecruisarea prin întindere sau compresiune mărește rezistența la oboseală a oțelurilor cu 10—40%; efecte similare se obțin în urma trefilării sîrmelor și a laminării tablelor de oțel. Efectul ecruisării este mai mic pentru cupru și alamă, fiind însă favorabil. În schimb, ecruisarea prin întindere micșorează rezistența la oboseală a aliajelor de aluminiu.

Dirrecția fibrelor, realizate prin forjare, trefilare, are de asemenea efect asupra rezistenței la oboseală: în direcție longitudinală rezistența la oboseală este maximă; transversal, ea se micșorează, în medie cu 25—35%.

Din motivele enumerate — fibre, defecte de material — piesele forjate au, în general, rezistențe la oboseală superioare celor turnate.

S-au făcut numeroase cercetări referitoare la efectul mărimii grăuntelui asupra rezistenței la oboseală. S-a constatat că la epruvetele din oțel carbon, granulația mare dă o scădere de 10—15% a rezistenței la oboseală. La epruvetele cu concentratori, din contră, granulația fină este dezavantajoasă. La oțeluri aliate, efectul defavorabil al granulației mari este mai ridicat, ajungînd pînă la 30%.

Date numeroase asupra acestor factori se găsesc în lucrările [25], [44], [63].

4.2. CONCENTRATORII DE EFORTURI UNITARE

4.2.1. Considerații generale asupra concentrării eforturilor unitare

Experiența a arătat că la piese cu variație bruscă de secțiune, calculate pe baza teoriei clasice a rezistenței materialelor, rupearea are loc la eforturi unitare inferioare celor pe care le suportă

piesele fără variație de secțiune. Cercetările făcute, teoretic și experimental, au arătat că în secțiunea periculoasă, unde are loc micșorarea bruscă de secțiune, eforturile unitare nu se mai distribuie conform legilor simple stabilite în rezistența materialelor, ci are loc o mărire sensibilă a acestora; fenomenul a primit denumirea de *concentrare a eforturilor unitare*. Fenomenul de concentrare a fost studiat la început pentru solicitări statice. Numeroase cazuri, în special cele care prezintă simetrie, au fost rezolvate prin teoria elasticității. Cazuri mai complexe s-au studiat experimental, prin foloelasticitate, sau alte metode.

a. La *solicitări statice*, fenomenul de concentrare a eforturilor unitare se manifestă prin modificarea legii de distribuție a eforturilor unitare pe secțiune (fig. 4.1), valorile maxime σ_M , τ_M

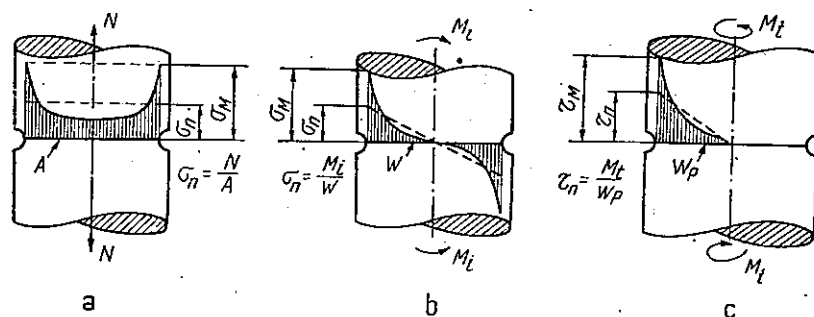


Fig. 4.1.

depășind pe cele *nominale*, calculate prin formulele uzuale din rezistența materialelor. Astfel, la cele trei exemple din fig. 4.1, *eforturile unitare nominale* sînt:

$$\text{— pentru întindere: } \sigma_n = \frac{N}{A}, \quad (4.1)$$

$$\text{— pentru încovoiere: } \sigma_n = \frac{M_t}{W}, \quad (4.2)$$

$$\text{— pentru răsucire: } \tau_n = \frac{M_t}{W_p}, \quad (4.3)$$

iar valorile maxime ale eforturilor unitare sînt:

$$\sigma_M = \alpha_k \sigma_n \quad \text{și} \quad \tau_M = \alpha_k \tau_n. \quad (4.4)$$

Pe figuri s-au trasat cu linie întreruptă distribuția teoretică a efortului unitar, conform rezistenței materialelor, și cu linie plină variația reală, care arată efectul de concentrare.

Coeeficientul α_k , măsurînd raportul între efortul unitar maxim real σ_M (τ_M) și cel nominal σ_n (τ_n), la solicitări statice, în regim elastic, se numește coeficient de concentrare a eforturilor unitare, sau coeficient de formă al concentratorului. Valorile coeficienților α_k , pentru diferite feluri de piese, de concentratori și de solicitări, au făcut obiectul a numeroase studii. Ele se găsesc determinate în monografiile ample, cum sînt lucrările [51], [66], [88] etc.

În calculul efortului unitar nominal, mărimile A , W , W_p se referă la secțiunea minimală, afară de cazul cînd se face mențiune specială în alt fel.

Variația bruscă de secțiune care dă loc fenomenului de concentrare a eforturilor unitare poartă numele de *concentrator*. Motive de ordin constructiv și tehnologic fac să existe diferite feluri de concentratori — variații de dimensiuni cu racordare, creștături laterale, găuri, filete, șanțuri de pană etc. — al căror efect va fi examinat în cele ce urmează.

Coeficienții de concentrare la solicitări statice α_k depind numai de elementele geometrice ale concentratorului, în special de raza de racordare: cu cît raza de racordare este mai mică (de exemplu la un filet), deci concentratorul este mai ascuțit, cu atît coeficientul de concentrare este mai mare. Valorile uzuale ale lui α_k sînt cuprinse între 1 și 3, dar pot ajunge uneori chiar la 5—8. Acest fapt arată cît de periculos este fenomenul de concentrare și ce greșeli se pot comite prin neluarea lui în considerație.

La trecerea din domeniul de solicitare elastic la cel plastic, în cazul metalelor tenace, fenomenul de concentrare a eforturilor unitare se modifică radical. Acest lucru se va ilustra prin exemplul barei cu creștătură periferică circulară, solicitată la întindere, din fig. 4.2. În interiorul acestei bare se pot lua în considerare, pentru studii, trei puncte: A — în fundul creștăturii unde există un efort unitar σ_x , paralel cu forța de întindere și unul circumferințial σ_θ ; B — în axa barei, în secțiunea periculoasă, cu o stare spațială, caracterizată prin eforturile unitare σ_x , σ_r , σ_θ ; C — departe de secțiunea periculoasă, unde există numai efortul unitar de întindere σ_x . În fig. 4.2, b s-a reprezentat variația eforturilor unitare σ_x , σ_r , σ_θ , pe secțiunea periculoasă, în cazul solicitării pur elastice: fenomenul de concentrare se manifestă prin valoarea maximă a lui σ_x . Este necesar a sublinia că în punctul A

există două eforturi unitare, de valori maxime, σ_x și σ_θ . Efectul rezultat depinde de ipoteza de rupere folosită. În mod convențional se aplică ipoteza I de rupere, luând în considerație numai maximum lui σ_x , ceea ce face ca definiția coeficientului de concentrare să fie

$$\alpha_k = \frac{\sigma_M}{\sigma_n} = \frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_n}$$

Rezultă că α_k , la piese de felul celei din fig. 4.2, nu dă imaginea exactă a stării de eforturi unitare din secțiune, ci numai

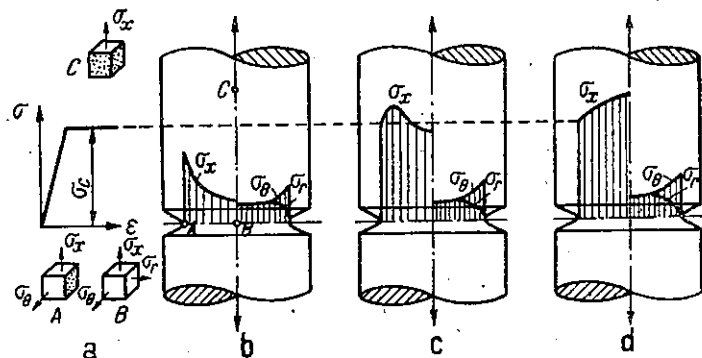


Fig. 4.2.

una apropiată. În fig. 4.2, c se arată diagrama de variație a eforturilor unitare principale σ_x , σ_θ , σ_r când o parte din secțiune, în apropierea punctului A, este solicitată plastic. Se observă că apare o egalizare a eforturilor unitare, maximum mutându-se la trecerea de la zona de solicitare plastică la cea elastică. În fig. 4.2, d se arată distribuția eforturilor unitare când întreaga secțiune este solicitată plastic: maximum nu mai este în concentrator, ci în axa piesei.

Din acest exemplu, rezultă că la solicitări statice în domeniul plastic — pentru metale tenace — efectul de concentrare a eforturilor unitare dispare și nu mai trebuie luat în considerare; din contra, fenomenul de concentrare trebuie luat în seamă la materiale fragile (oțeluri de mare rezistență, fonte).

b. La solicitări variabile, în piese de mașini sau de construcții, fenomenul de concentrare a eforturilor unitare este de asemenea frecvent și cu efect defavorabil. Coeficientul de concentrare, nu-

mit de obicei *coeficient efectiv de concentrare* are cu totul altă definiție: el este raportul a două rezistențe la oboseală

$$\beta_k = \frac{\sigma_R}{\sigma_{Rk}} \text{ sau } \beta_k = \frac{\tau_R}{\tau_{Rk}},$$

unde:

σ_R este rezistența la oboseală, prin ciclu de coeficient de asimetrie R, a apruvetei netede;

σ_{Rk} — rezistența la oboseală a epruvetei cu concentrator, avînd, în secțiunea slăbită, aceleași dimensiuni ca epruveta netedă.

Cum solicitarea variabilă prin ciclu asimetric se poate considera ca suprapunerea unei solicitări variabile prin ciclu simetric, de amplitudine σ_v , peste o solicitare statică de mărime σ_m și cum coeficientul efectiv de concentrare este specific solicitării variabile, determinările coeficienților β_k s-au făcut în special pentru solicitări simetrice, definiția devenind

$$\beta_k = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} \text{ sau } \beta_k = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1k}}. \quad (4.5)$$

În calcule, coeficientul β_k se va aplica numai asupra părții variabile σ_v a unui ciclu asimetric.

În literatura tehnică se întîlnesc notații variate pentru coeficientul β_k , și anume: β_k — în lucrarea de față și în lucrările [24], [80]; k_{-1} — în lucrarea [57]; k_σ , k_τ — în lucrarea [75]; k_d — în lucrarea [4]; K_f — în lucrarea [44]; K_σ , K_τ — în lucrarea [38] etc. Este de așteptat ca, în baza unei standardizări internaționale, să se aleagă un simbol unitar. În cele ce urmează, simbolul β_k va fi completat, după necesitate, prin diferiți indici.

c. Factorul dimensional la solicitări variabile. Practica a arătat că pentru piese similare din punct de vedere geometric, cu aceeași stare a suprafeței și făcute din același material, rezistența la oboseală scade o dată cu creșterea dimensiunilor. Ca urmare se poate defini un factor dimensional

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_{-1})_d}{(\sigma_{-1})_{d_0}}, \quad (4.6)$$

unde:

$(\sigma_{-1})_d$ este rezistența la oboseală a epruvetei, avînd un diametru oarecare $d > d_0$;

$(\sigma_{-1})_{d_0}$ — rezistența la oboseală a epruvetei standardizate, avînd diametrul d_0 .

Analog se poate defini factorul dimensional pentru epruvete cu concentratori

$$\varepsilon_k = \frac{(\sigma_{-1k})d}{(\sigma_{-1k})d_0} \quad (4.7)$$

4.2.2. Coeficienți efectivi de concentrare pentru piese din oțel

Se vor reda, pe baza literaturii existente, o serie de valori ale coeficienților β_k pentru diferite tipuri de concentratori.

4.2.2.1 Bare de secțiune circulară, cu variație de diametru, realizată cu racordare circulară

Acest concentrator este frecvent la arborii cu variații de diametru, la fusuri etc.

a. Pentru solicitări de întindere-compresiune, coeficienții β_k la trei calități de oțel și coeficientul α_k sînt dați în diagrama din fig. 4.3. Diagramele sînt valabile pentru raportul $c_0 = \frac{D}{d} = 2$, respectiv sînt stabilite pentru epruvete cu $d = 30 \dots 50$ mm [75].

b. Pentru solicitări de încovoiere, coeficienții β_k se pot lua din diagrama din fig. 4.4, valabilă, de asemenea, pentru $\frac{D}{d} = 2$ și $d = 30 \dots 50$ mm.

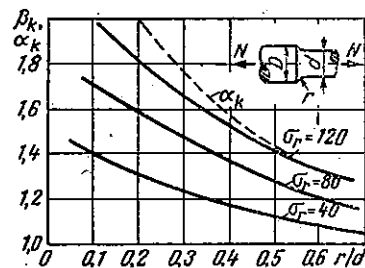


Fig. 4.3.

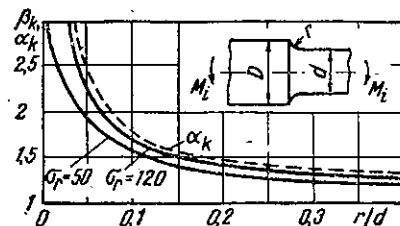


Fig. 4.4.

În fig. 4.5—4.9 sînt reprezentate diagramele trase în urma calculelor făcute de către B. Horovitz.

S-au calculat astfel coeficienții de concentrare pentru anumite materiale, respectiv diferite valori ale raportului $\frac{D}{d}$, la epruveta

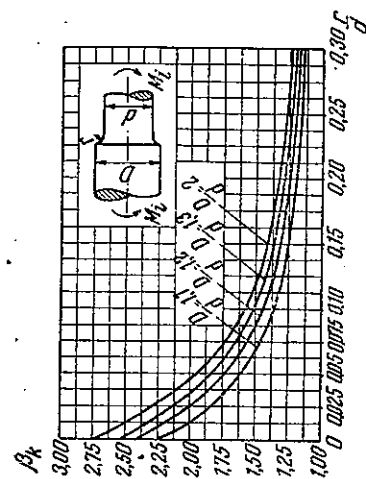


Fig. 4.7.

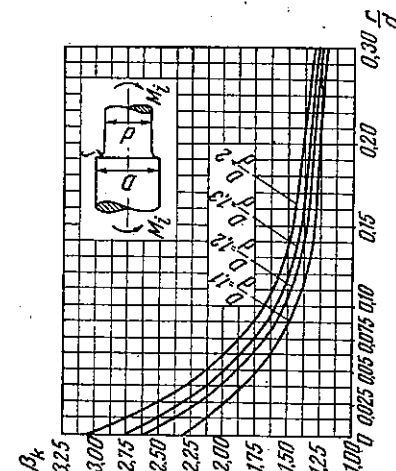


Fig. 4.8.

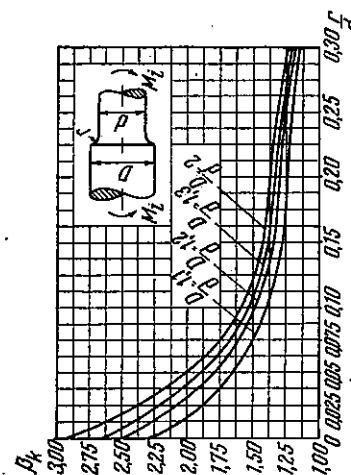


Fig. 4.5.

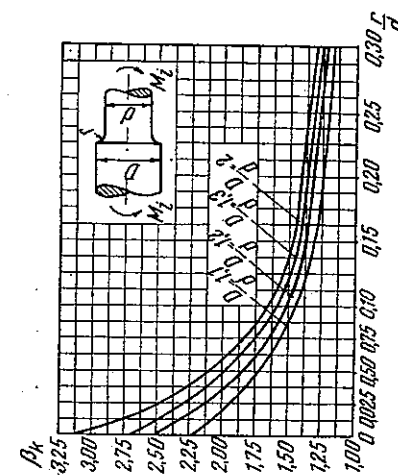


Fig. 4.6.

cu $d=30 \dots 40$ mm: diagrama din fig. 4.5 se folosește pentru oțeluri cu $\sigma_r = 40 \dots 50$ kgf/mm²; diagrama din fig. 4.6 pentru oțeluri cu $\sigma_r = 60$ kgf/mm²; diagrama din fig. 4.7 pentru oțeluri cu $\sigma_r = 70$ kgf/mm²; diagrama din fig. 4.8 pentru oțeluri cu $\sigma_r = 80$ kgf/mm² și diagrama din fig. 4.9 pentru oțeluri aliate cu $\sigma_r = 120 \dots 140$ kgf/mm².

c. La solicitările de răsucire, coeficienții β_k sînt dați în fig. 4.10, valorile corespunzînd la $\frac{D}{d} = 2$ și $d=30 \dots 50$ mm.

Pentru oțeluri cu alte rezistențe de rupere, valorile coeficienților de concentrare se pot determina prin interpolare, între curbele de pe diagramele cunoscute. Pentru alt raport $\frac{D}{d}$, coeficienții β_k se determină prin relația

$$\beta_k = 1 + \xi(\beta_{k0} - 1), \quad (4.8)$$

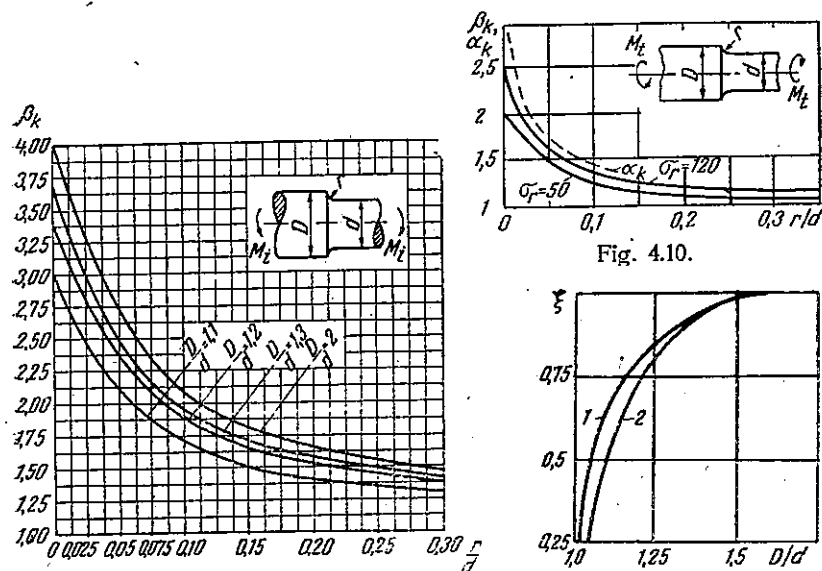


Fig. 4.10.

Fig. 4.9.

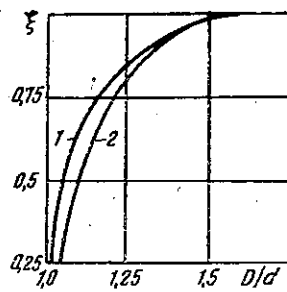


Fig. 4.11.

în care coeficientul ξ se ia din fig. 4.11 (curba 1 pentru încovoiere și 2 pentru răsucire), iar β_{k0} sînt valorile corespunzătoare raportului $\frac{D}{d} = 2$, date în fig. 4.4 și 4.10.

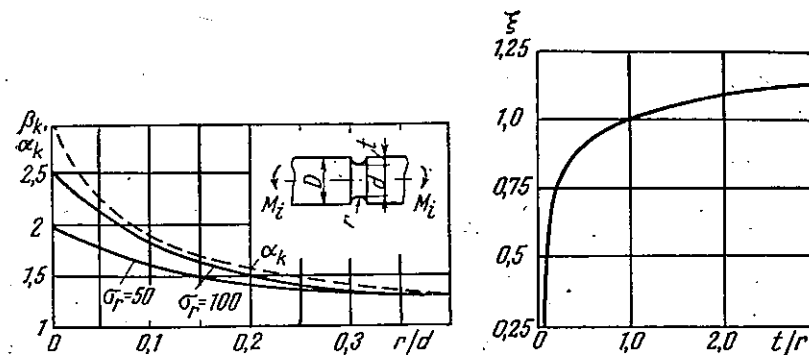


Fig. 4.12.

Fig. 4.13.

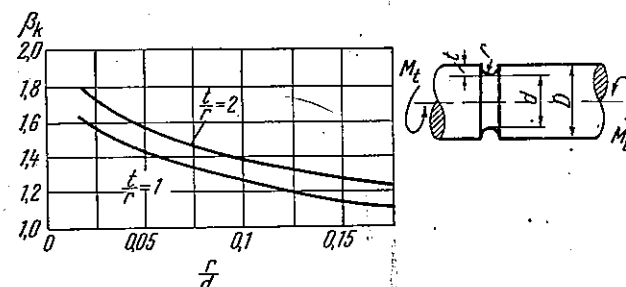


Fig. 4.14.

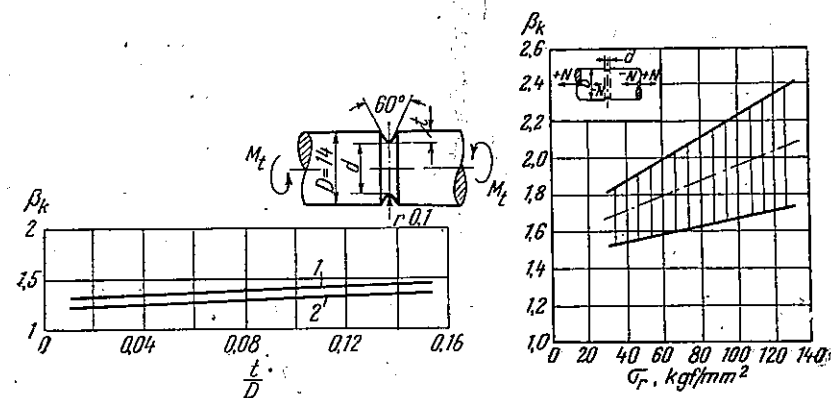


Fig. 4.15.

Fig. 4.16.

4.2.2.2. Bare de secțiune circulară, cu creștătură periferică

a. Pentru solicitări de încovoiere, coeficienții de concentrare se pot lua din fig. 4.12, curbele fiind valabile pentru $\frac{t}{r}=1$ și $d=30 \dots 50$ mm. Pentru alte rapoarte $\frac{t}{r}$, coeficientul de concentrare este dat de relația (4.8), în care ξ se va lua din fig. 4.13, iar β_{k0} sînt valorile din fig. 4.12.

b. Pentru solicitări de răsucire se folosesc diagramele următoare: diagrama din fig. 4.14, valabilă pentru oțel carbon cu $\sigma_r=50$ kgf/mm² și epruvete cu $d=14$ mm; diagrama din fig. 4.15 pentru creștături ascuțite la 60°: curba 1 pentru oțel aliat cu $\sigma_r > 90$ kgf/mm², curba 2 pentru oțel carbon cu $\sigma_r < 50$ kgf/mm².

4.2.2.3. Bare de secțiune circulară, cu găuri transversale

a. Pentru solicitări de întindere și întindere-compresiune se dau valorile din fig. 4.16 (tot cîmpul hașurat al diagramei), în funcție de rezistența oțelului. Încercările s-au făcut pentru $D=4$ mm și $\frac{d}{D}=0,146$; $0,213$ și $0,532$. În medie, rezultă $\beta_k=1,6 \dots 2,0$.

b. Pentru solicitări de încovoiere, se pot folosi diagramele din fig. 4.17—4.19. Diagrama din fig. 4.17 dă variația lui β_k în funcție de raportul $\frac{d}{D}$: curba 1 este trasată pentru oțel cu $\sigma_r > 100$ kgf/mm² și $D=12 \dots 16$ mm; curba 2 — pentru oțel cu $\sigma_r \leq 65$ kgf/mm² și $D=40 \dots 50$ mm; curba 3 — pentru oțel cu $\sigma_r > 65$ kgf/mm² și $D=6 \dots 8$ mm; curba punctată este trasată pentru coeficientul α_k . În fig. 4.18 se dau coeficienții β_k funcție de σ_r : curba 1 se folosește pentru $\frac{d}{D}=0,05 \dots 0,1$ și $D=40 \dots 50$ mm; curba 2 — pentru $\frac{d}{D}=0,10 \dots 0,20$ și $D=40 \dots 50$ mm; curba 3 — pentru $\frac{d}{D}=0,15 \dots 0,25$ și $D=6 \dots 8$ mm. În fig. 4.19 se dă variația lui β_k în funcție de $\frac{d}{D}$, pentru trei calități de oțel crom-nichel și două calități de oțel carbon [24].

c. Pentru solicitări de răsucire se folosesc datele din fig. 4.20, funcție de rezistența oțelului: curba 1 se folosește pentru $\frac{d}{D}=0,05 \dots 0,25$ și $D=40 \dots 60$ mm și curba 2 — pentru $\frac{d}{D}=0,05 \dots 0,25$ și $D=12 \dots 16$ mm.

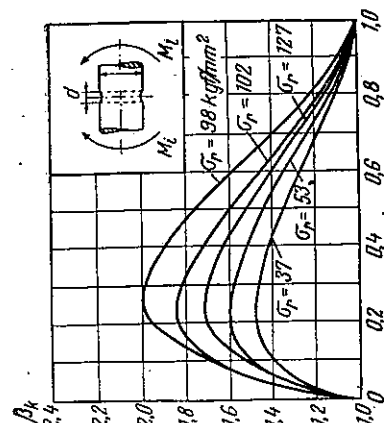


Fig. 4.19.

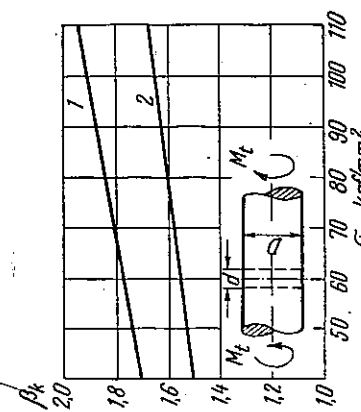


Fig. 4.20.

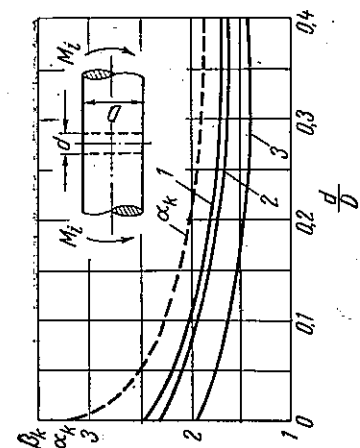


Fig. 4.17.

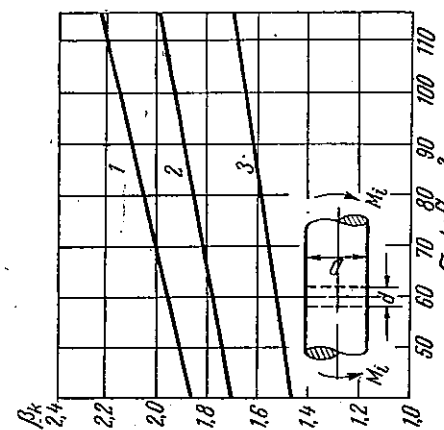


Fig. 4.18.

4.2.2.4. Platbande cu găuri.

Pentru platbande, se găsesc în literatură numeroase date asupra coeficienților de concentrare α_k . La nevoie se vor folosi acestea în relațiile ce se vor stabili în continuare. În fig. 4.21 se dau valorile lui β_k pentru platbande găurite, din OL 38, solicitate la întindere-compresiune. De asemenea, în fig. 4.22 se dau coeficienții β_k pentru întindere-compresiune, sau încovoiere, funcție de σ_r , stabiliți pentru rapoarte $\frac{d}{D} = 0,05 \dots 0,3$.

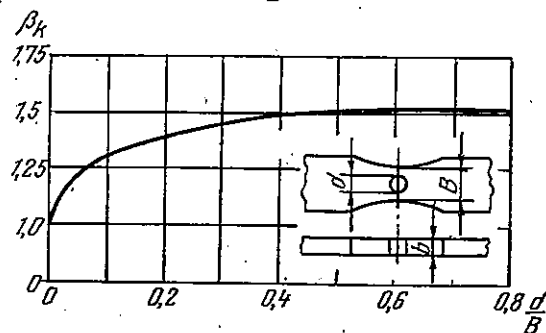


Fig. 4.21.

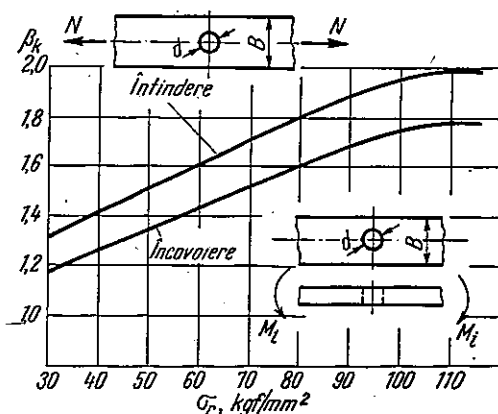


Fig. 4.22.

4.2.2.5. Coturi și arbori cotiți

Pentru piese cotite, solicitate la încovoiere, coeficienții α_k , β_k se iau din fig. 4.23: curba 1 se folosește pentru determinarea coeficientului α_k ; curba 2 — pentru β_k , oțel aliat cu $\sigma_r =$

$= 90 \text{ kgf/mm}^2$; curba 3 pentru β_k , oțel carbon. Pentru arbori cotiți, se folosesc: diagrama din fig. 4.24, pentru încovoierea manivelei, la $d=40 \dots 70 \text{ mm}$ și diagrama din fig. 4.25, pentru răsucirea manetonului, la $d=40 \dots 70 \text{ mm}$.

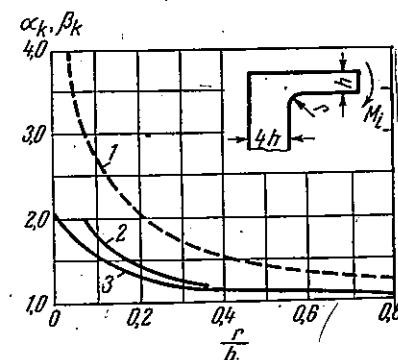


Fig. 4.23.

Problema concentrării eforturilor unitare la arbori cotiți nu este încă pe deplin rezolvată. În lucrări de specialitate se găsesc diferite valori ale coeficienților de concentrare. Astfel, în tratatul

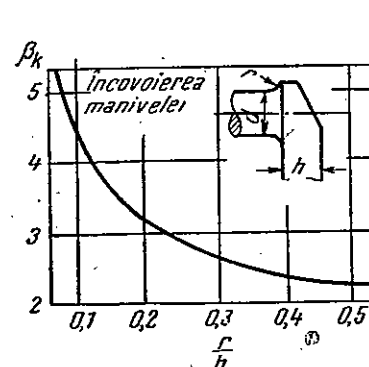


Fig. 4.24.

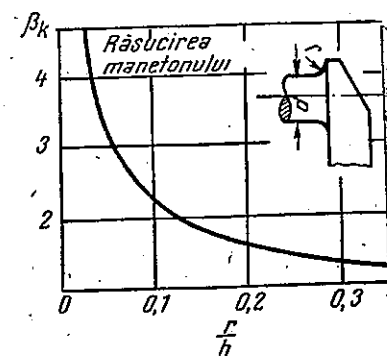


Fig. 4.25.

de Organe de mașini, vol. II, publicat sub redacția lui N. S. Acerkan (Mașghiz, 1953), se recomandă valorile din tabela 4.1 pentru coeficientul β_k/e . Prin notația β_k/e se înțelege coeficientul de concentrare, inclusiv factorul dimensional, determinat pe piesa reală.

Tabela 4.1

Coeficientul $\frac{\beta_k}{\varepsilon}$ pentru arbori cotiți (notații pe fig. 4.24 și 4.25)

Încovoiere		Răsucire	
r/h	β_k/ε	r/h	β_k/ε
0,15	3,5	0,06	2,65
0,20	2,8	0,10	2,2
0,25	2,4	0,15	1,9
0,30	2,1	0,20	1,7
0,35	2,0		

4.2.2.6. Montaje presate

Fără a fi, din punct de vedere geometric, concentratori de eforturi unitare, montajele presate (butuc fretat pe arbore) au efecte similare concentratorilor. Presiunea de contact între butuc și arbore este neuniform distribuită, ea avînd maxime în punctele de trecere de la arborele liber la cel aflat în butuc. Aceste locuri constituie concentratori de eforturi unitare, care sînt luați în considerare, la solicitări statice sau variabile, prin coeficienții α_k , β_k . În fig. 4.26 se dau coeficienții efectivi de concentrare, inclusiv factorul dimensional, pentru montaje presate: curba 1 cînd bucsa transmite o forță sau cuplu; curba 2, cînd bucsa nu transmite sarcini. Graficele sînt construite pentru arbore de oțel cu $\sigma_r = 50 \text{ kgf/mm}^2$, respectiv pentru o presiune între bucsă și arbore $p \geq 3 \text{ kgf/mm}^2$ [75]. Pentru alte rezistențe de rupere, respectiv altă presiune de fretaj, coeficientul de concentrare este

$$\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon}\right) = \left(\frac{\beta_k}{\varepsilon}\right)_0 \cdot \xi' \cdot \xi'', \quad (4.9)$$

unde $\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon}\right)_0$ sînt valorile din fig. 4.26, iar coeficienții de corecție ξ' , ξ'' se iau din fig. 4.27 și 4.28.

Valorile din fig. 4.26 sînt pentru arbori solicitați la încovoiere; cînd solicitarea este de răsucire, coeficientul de concentrare este

$$\frac{\beta_{k\tau}}{\varepsilon} = 1 + 0,6 \left(\frac{\beta_{k\sigma}}{\varepsilon} - 1 \right), \quad (4.10)$$

în care $\beta_{k\sigma}/\varepsilon$ se determină în baza fig. 4.26—4.28. În funcție de forma pe care o au arborele și butucul, în montajul presat, coeficienții de concentrare variază destul de mult, cum se arată în

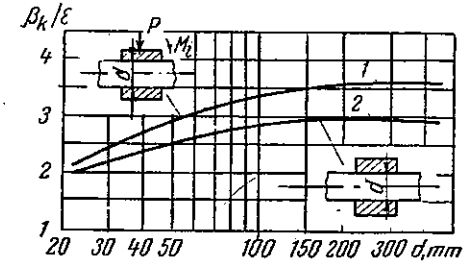


Fig. 4.26.

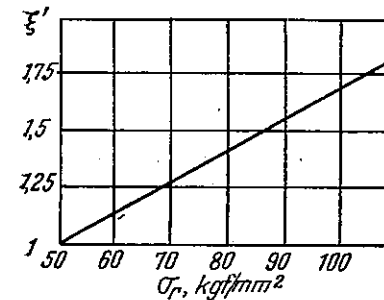


Fig. 4.27.

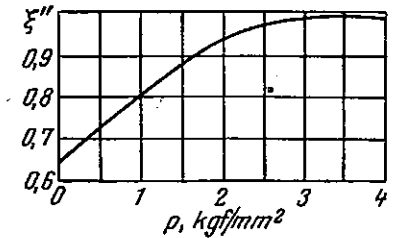


Fig. 4.28.

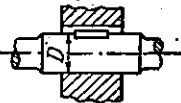
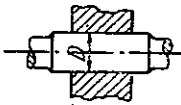
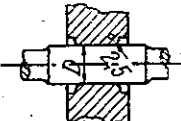
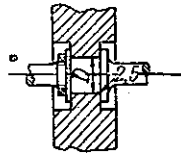
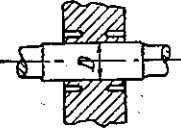
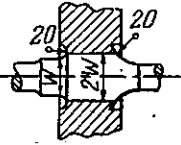
tabela 4.2. Din examinarea tabelii, se vede ce importanță au degajările la marginea butucului, pentru micșorarea coeficientului de concentrare. Coeficienții din tabela 4.2 se referă la arbori solicitați la încovoiere; pentru răsucire, la pozițiile 1—5 din tabelă, se va lua numai 60—70% din aceste valori.

Coeficienții din tabela 4.2 sînt determinați pentru arbori din oțel cu $\sigma_r = 50 \text{ kgf/mm}^2$. Pentru alte calități de oțel, valoarea de la poziția 2 a tabelii se înlocuiește prin: 1,6 la OL 42; 2,15 la OL 60; 2,35 la OL 70; 2,7—2,8 la oțeluri crom-nichel.

• — Calculul de rezistență la solicitări variabile

Tabela 4.2

Coeficientul de concentrare β_k pentru diferite forme de montaje presate [80]

Nr. crt.	Forma aborelui și butucului	β_k	Observații
1		2,0	Montaj fix, arbore cu pană
2		2,0	Cu joc de fretaj de 2‰
3		1,7	Butuc din oțel de rulmenți călit, fretat cu joc de 2‰
4		2,2 ¹⁾ 1,5 ²⁾	Butuc din oțel de rulment călit, cu contact alunecător: 1) referitor la sediul bucsei 2) referitor la partea filetată
5		1,6	Butuc fretat cu joc de 2‰
6		1,0	Butuc fretat cu joc de 2‰, arbore cu variație de diametru de la W la 2W

4.2.2.7. Șanțuri de pană

Șanțurile de pană constituie concentratori puternici. În tabela 4.3 se dau valori ale lui β_k pentru arbori solicitați la încovoiere, atât în varianta când arborele nu are nimic montat pe el, cât și în cea când este împănăt cu o roată. Raza de racordare a șanțului este de 0,25 din lățimea lui; restul dimensiunilor sînt

Tabela 4.3

Coeficientul β_k pentru arbori cu șanțuri de pană, liberi sau încărcăți, solicitați la încovoiere

Materialul arborelui	Rezistența de rupere σ_r kgf/mm ²	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²	Coeficientul β_k			
			Forma A șanț liber		Forma B șanț încărcat	
			Raportat la secțiunea brută		Raportat la secțiunea netă	
			brută	netă	brută	netă
OLC16	37	17	1,90	1,25	2,45	1,70
OLC25	43	19	1,73	1,15	2,40	1,72
OLC45	59	24	1,85	1,23	3,20	2,30
Oțel cu 0,75% Cr, 3,5% Ni	82	37	2,50	1,65	4,35	3,10

Observație. La forma A, $W_{net} \approx 0,67 W_{brut}$ și la forma B, $W_{net} \approx 0,7 W_{brut}$, unde W_{brut} este modulul de rezistență al secțiunii pline și W_{net} — modulul de rezistență al secțiunii slăbite.

Tabela 4.4

Coeficientul β_k pentru arbori cu două șanțuri de pană, neîncărcați, solicitați la răsucire

Rezistența de rupere σ_r kgf/mm ²	Limita de curgere	Rezistențe la oboseală		β_k cu τ_n , raportat la secțiunea brută
	σ_c kgf/mm ²	σ_{-1} kgf/mm ²	τ_{-1} kgf/mm ²	
43	21,5	17	10	1,55
56	31,5	24	14	1,75
65	50,4	32	—	1,85
88	55,5	43	—	2,25

arătate pe desen. În tabela 4.4 se dau valori pentru β_k , în cazul arborilor solicitați la răsucire. În fig. 4.29 se dau valori ale lui β_k , pentru îmbinări prin arbori canelați, solicitați la răsucire și anume: pentru profilul din poz. a, $\beta_k = 1,09$; pentru profilul din poz. b, $\beta_k = 1,92$; pentru profilul din poz. c, $\beta_k = 2,5 \dots 3,2$; pentru profilul din poz. d, $\beta_k = 2,2 \dots 2,7$, iar pentru profilul din poz. e în evolventă, $\beta_k = 1,2 \dots 1,5$.

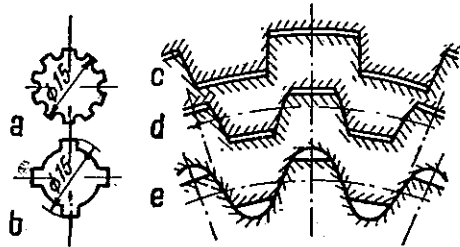


Fig. 4.29.

4.2.2.8. Filete

a. Pentru solicitări de întindere-compresiune, coeficienții β_k se iau din fig. 4.30: curba 1 se folosește pentru determinarea lui α_k ; curba 2 — β_k pentru oțel aliat și $d = 12$ mm; curba 3 — oțel carbon cu $\sigma_r = 40$ kgf/mm² și $d = 12$ mm. Raportul $\frac{r}{t} = 0,155$ corespunde filetului metric, iar $\frac{r}{t} = 0,215$ — filetului în țoli. Pentru alte calități de oțel se folosește formula

$$\beta_k = \xi \cdot \beta_{k0}, \quad (4.11)$$

în care β_{k0} corespunde curbei 3 din fig. 4.30, iar ξ se ia după fig. 4.31.

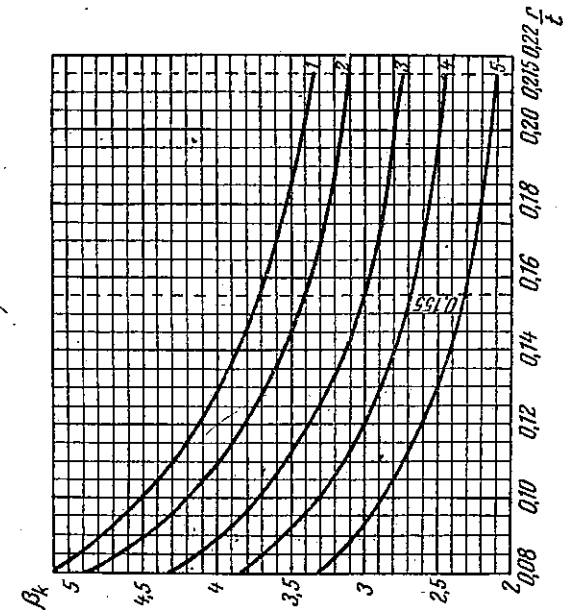


Fig. 4.32.

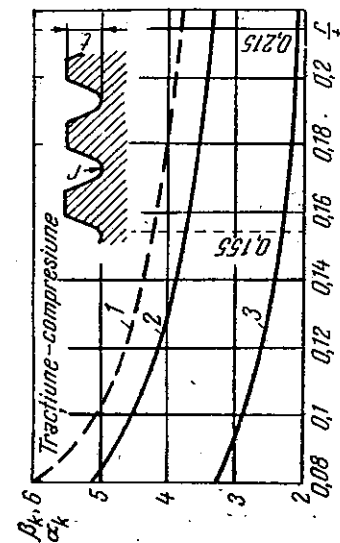


Fig. 4.30.

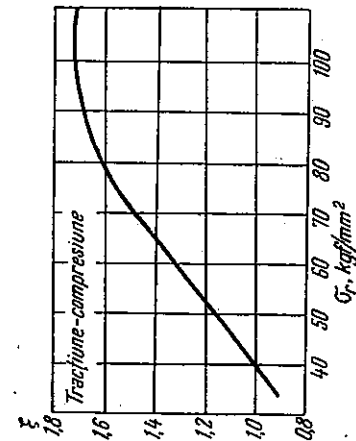


Fig. 4.31.

Alte valori ale lui β_k se găsesc în figura 4.32: curba 1 este trasată pentru oțel aliat cu $\sigma_r \geq 100 \text{ kgf/mm}^2$; curba 2 — oțel cu $\sigma_r = 70 \text{ kgf/mm}^2$; curba 3 — oțel cu $\sigma_r = 60 \text{ kgf/mm}^2$; curba 4 — oțel cu $\sigma_r = 50 \text{ kgf/mm}^2$; curba 5 — oțel cu $\sigma_r = 40 \text{ kgf/mm}^2$. Se dau, de asemenea, valorile din tabela 4.5, pentru buloane care transmit sarcina prin piuliță. Cifrele se referă la șuruburi cu $d \geq 20 \text{ mm}$.

Tabela 4.5

Coeficientul β_k pentru întindere-compresiune, la buloane cu sarcina transmisă prin piuliță.

Felul filetelui	Materialul bulonului	
	Oțel carbon	Oțel aliat, tratat termic
În țoli	3,6—3,8	4,2—4,4
Metric	4,8—5,0	5,5—5,8

Observație. Valorile din tabelă se referă la filetul tăiat. Când filetul este executat prin rulare, valorile se scad: cu 14—18% la oțel carbon, cu 20—24% la oțel aliat necălit, cu 30—40% la oțel călit. Folosirea unei piulițe cu șanț circular de descărcare reduce coeficientul de concentrare cu 30%.

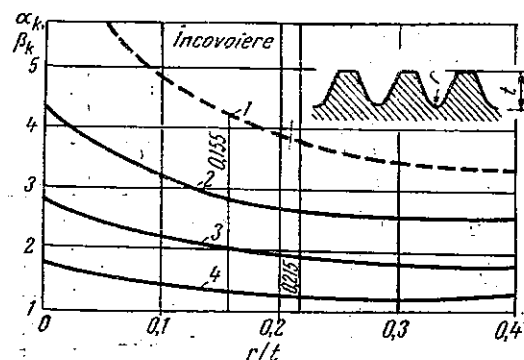


Fig. 4.33.

b. Pentru solicitări de încovoiere se folosește fig. 4.33, în care: curba 1 se folosește pentru determinarea lui α_k ; curba 2 — β_k pentru oțel aliat cu $\sigma_r > 150 \text{ kgf/mm}^2$ și $d = 15 \text{ mm}$; curba 3 — oțel aliat cu $\sigma_r = 80 \text{ kgf/mm}^2$ și $d = 15 \text{ mm}$; curba 4 — oțel car-

bon cu $\sigma_r = 40 \text{ kgf/mm}^2$ și $d = 15 \text{ mm}$. Pentru alte calități de oțel se aplică formula (4.11), în care β_{k0} corespunde curbei 4 din fig. 4.33, iar coeficientul ξ se ia din fig. 4.34.

4.2.2.9. Alți concentratori

a. Pentru ochiurile din capetele tijelor solicitate la întindere prin ciclu pulsator, se dau o serie de valori ale lui β_k în tabela 4.6. Coeficienții de concentrare se referă la secțiunea I—II, solicitată la întindere și au fost determinați, pentru cele trei forme ale capetelor tijelor, prin încercări pulsatoare pînă la $2 \cdot 10^6$ cicluri. Materialul tijelor a fost oțel carbon, cu $\sigma_r = 69 \text{ kgf/mm}^2$ și $\sigma_c = 41 \text{ kgf/mm}^2$. Se observă avantajul pe care îl prezintă ochiurile cu partea frontală îngroșată, din schițele 2, 3 ale tabeli 4.6.

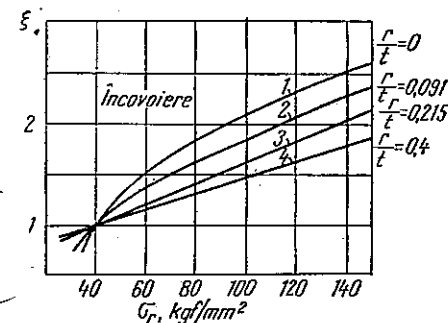


Fig. 4.34.

Tabela 4.6

Coeficienți de concentrare pentru ochiurile din capetele tijelor

Felul ochiului	$\frac{b}{d}$	Jocul bulonului	Rezistența la oboseală σ_0 kgf/mm ²	β_k
1	2	Fără joc	13,4	2,4
1	2	Cu 0,6% joc	11,8	2,7
2	2	Cu 0,6% joc	18,6	1,7
3	2	Cu 0,6% joc	18,4	1,7

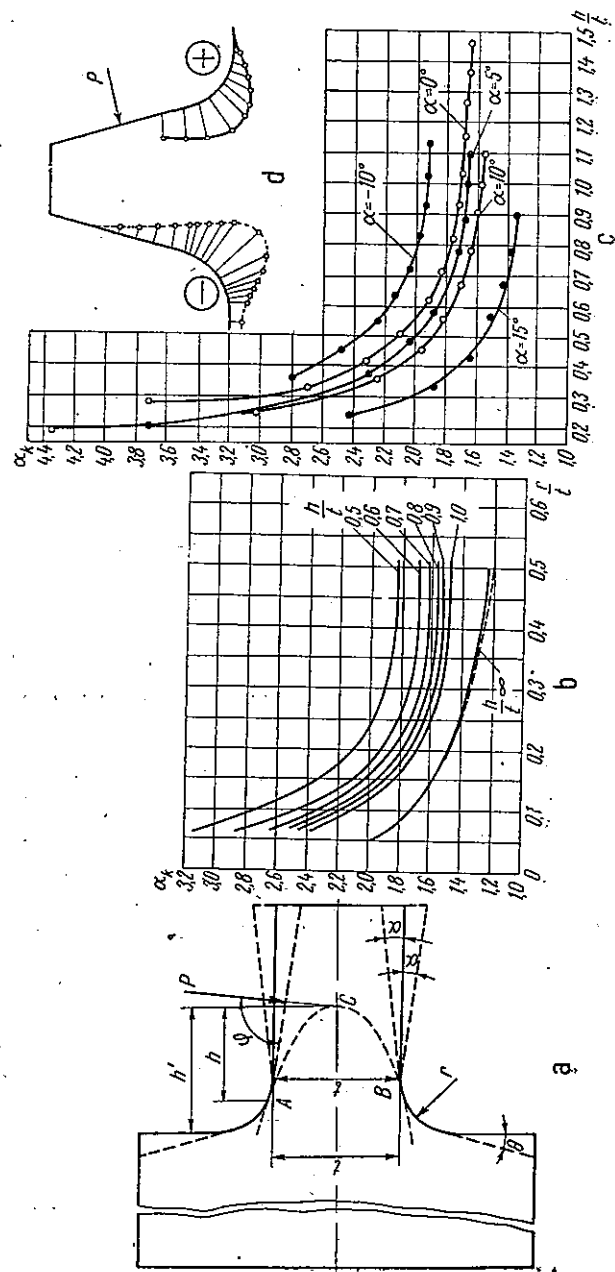


Fig. 4.35.

b. Pentru dinți de angrenaje se dau diverse grafice sau formule de calcul al coeficientului de concentrare α_k . Astfel, pentru roți cu profil în evolventă, cu unghi de angrenare de 20° , se poate lua

— la roți prelucrate prin rostogolire

$$\alpha_k = 1,65 - \frac{2,5}{z}; \quad (4.12)$$

— la roți prelucrate prin copiere

$$\alpha_k = 1 + 0,15 \frac{t}{\rho}; \quad (4.13)$$

unde z este numărul de dinți, iar t, ρ — dimensiuni arătate pe fig. 4.35.

Coeficientul α_k se poate lua și din fig. 4.35, în care fig. 4.35, a reprezintă definirea dimensiunilor, α fiind unghiul de angrenare, iar linia punctată reprezentînd conturul parabolei de egală rezistență; fig. 4.35, b — valorile lui α_k pentru $\theta=0, \alpha=0, \varphi=90^\circ$; fig. 4.35, c — valorile lui α_k pentru $\theta=0, \varphi=90^\circ, \frac{\rho}{t}=0,225$, la diferite unghiuri α ; fig. 4.35, d — distribuția eforturilor unitare pe conturul dintelui (stînga compresiune, dreapta întindere) pentru $\frac{\rho}{t}=0,23, \frac{h}{t}=0,56, \theta=0, \alpha=15^\circ, \varphi=90^\circ$.

Pentru calcularea lui β_k se va aplica formula (4.14).

4.2.3. Coeficienți efectivi de concentrare pentru piese din fontă

a. Pentru arbori cu gaură transversală, solicitați la încovoiere, coeficienții de concentrare se iau din fig. 4.36. Diagrama este construită pentru fontă cenușie, cu $\sigma_r = 20 \text{ kgf/mm}^2$ și $\frac{d}{D} = 0,10 \dots 0,15$. Pentru alte calități de fontă, se aplică formula (4.11), în care β_{k0} sînt valorile din fig. 4.36, iar ξ se ia din fig. 4.37. Pentru același concentrator, în cazul solicitării de răsucire, se folosește fig. 4.38, valabilă pentru $\sigma_r = 22 \text{ kgf/mm}^2$ și $\frac{d}{D} = 0,1$.

b. Pentru arbori cu creștătură circulară periferică, solicitați la încovoiere, coeficientul β_k se ia din fig. 4.39. Diagrama este

valabilă pentru fontă cenușie cu $\sigma_r = 29 \text{ kgf/mm}^2$, $\frac{D-d}{D} = 0,33$ și $d = 8 \text{ mm}$. Pentru alt raport $\frac{D-d}{D}$, se aplică formula (4.11), în care β_{k0} se ia din fig. 4.39, iar ξ , din fig. 4.40.

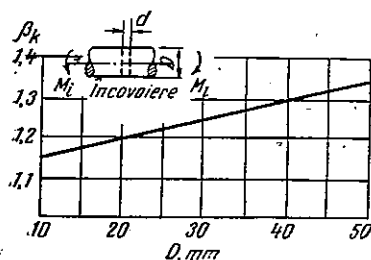


Fig. 4.36.

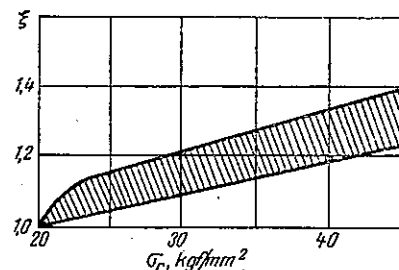


Fig. 4.37.

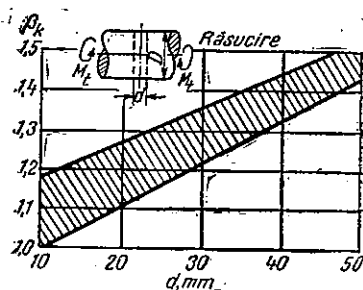


Fig. 4.38.

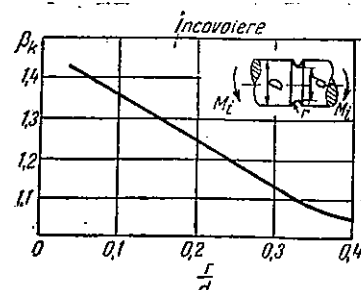


Fig. 4.39.

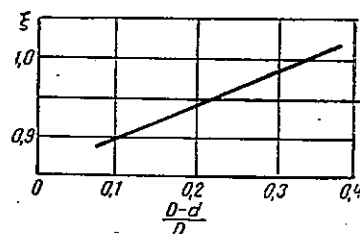
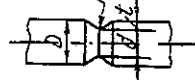


Fig. 4.40.

c. Pentru alte câteva piese (dinți de angrenaje, arbori cotiți, arbori cu racordări sau creștături), supuse la diferite solicitări, se dau coeficienții de concentrare din tabela 4.7.

Coeficienții β_k la unele piese din fontă [75]

Tabela 4.7

Nr. crt.	Forma și dimensiunile piesei	Solicitarea	β_k
1		Prin rostogolire	1,2
		Prin copiere	1,3
2		Incovoiere	2—2,5 *
		Răsucire	2—3 *
3		$d = 12 \text{ mm}$	1,15
		$d = 50 \text{ mm}$	1,25
4		Întindere-compreziune	1,1—1,4 *

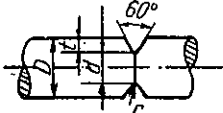
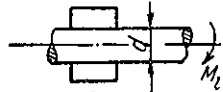
Observație. Valorile mici se referă la fonte inferioare, iar cele mari, la fonte aliate.

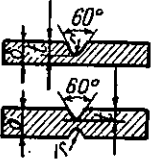
4.2.4. Coeficienți de concentrare pentru piese din aliaje ușoare

Pentru piese din aliaje ușoare, pe bază de aluminiu și magneziu, în tabela 4.8 se dă o serie de valori ale coeficienților de concentrare α și β_k . Denumirile aliajelor corespund standardelor sovietice. Valorile mai mici ale coeficienților η_1 și β_k corespund aliajelor la care raportul σ_{-1}/σ_r are valori mici. Coeficientul η este cel definit la formula (4.14).

Tabela 4.8

Coeficienții α_k și β_k pentru aliaje ușoare

Nr. crt.	Schița concentratorului	Dimensiunile epruvetei folosite	Solicitarea	Coeficientul de concentrare α_k	Materiaul	Coeficientul de sensibilitate, η	Coeficientul efectiv de concentrare, β_k
1		$d=8 \text{ mm}$ $\frac{D}{d}=1,25...1,5$ $t=r$ $\frac{r}{d}=0,1...0,12$	I	~ 2	A B C D E	0,4...1 0,7...1 0...0,3 0,8...0,9 0,7...1	1,4...2 1,7...2 1...1,3 1,8...1,9 1,5...2
			II	~ 2	A B C D	0,4...0,8 0,7...1 0,3...0,8 0,6...0,8	1,4...1,8 1,7...2 1,3...1,8 1,6...1,8
2		$d=8 \text{ mm}$ $\frac{D}{d}=1,02...1,6$ $r=0,05 \text{ mm}$ $\frac{r}{d}=0,006$ $\frac{t}{r}=4...4,5$	I	4,5...6	A B C D	0,2...0,6 0,3...0,6 0...0,1 0,05...0,4	1,8...4,3 1,9...3,5 1,0...1,4 1,1...2,6
3		$d=70 \text{ mm}$	I	—	B	—	2,3...3

4		$r=0,02...0,05 \text{ mm}$ $\frac{t}{r}=3...15$ $\frac{\delta}{t}=20$	I și II	4...7	B, D	0...0,2	1...2
5							
6		$b=40 \text{ mm}$ $d=1...6 \text{ mm}$ $\delta=1,5...4 \text{ mm}$	I	1,6...2,5	B, D	0,2...0,5	1,3...1,8
			II	2,5...3	B, D	0,1...0,4	1,2...1,8
7		$b=12 \text{ mm}$ $r=t=1,6 \text{ mm}$ $\delta=0,5 \text{ mm}$	I	< 2	B, D	0,5...1	1,5...2

Observație. I — solicitare la încovoiere.

II — solicitare la tracțiune, ciclu simetric. Pentru ciclul asimetric, coeficientul β_k se aplică numai la amplitudinea σ_a a ciclului.A — aliaje pentru turnat cu magneziu. Aliajul tip ML 4 și aliajul cu 9% Al; 0,1% Mn; 2% Zn; $\sigma_r=14...27 \text{ kgf/mm}^2$; $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}=0,32...0,42$ (rareori 0,54). Raportul $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}$ s-a stabilit cu 10^8 cicluri. Apoi $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}=0,21...0,3$ (rareori 0,4) stabilit cu 5×10^8 cicluri.B — aliaje cu magneziu, deformabile, tip MA2, MA3, MA5, $\sigma_r=21...35 \text{ kgf/mm}^2$.C — aliaje pentru turnat tip AL5, AL7, AL8, AL9, $\sigma_r=14...36 \text{ kgf/mm}^2$; $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}=0,17...0,38$, stabilit cu 10^8 cicluri.D — aliaj pentru turnat din aluminiu cu 10% Cu; 1,2% Fe; 0,24% Mg; $\sigma_r=19 \text{ kgf/mm}^2$; $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}=0,3...0,38$.E — aliaje de aluminiu deformabile, tip D16, AK2, AK8; $\sigma_r=21...49 \text{ kgf/mm}^2$; $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}=0,2...0,4$, stabilit cu $10^8...5 \times 10^8$ cicluri.

4.2.5. Observații generale asupra coeficienților de concentrare

a. Datele experimentale arată că valorile coeficientului de concentrare β_k sînt totdeauna inferioare lui α_k . În literatura tehnică este răspîndită relația de transformare

$$\beta_k = 1 + \eta(\alpha_k - 1), \quad (4.14)$$

în care η se numește *coeficient de sensibilitate*. Valorile lui η depind de natura materialului, starea suprafeței etc.

În fig. 4.41 se dau valorile lui η pentru cîteva forme de concentratori, pentru diferite calități de oțeluri, în funcție de raportul

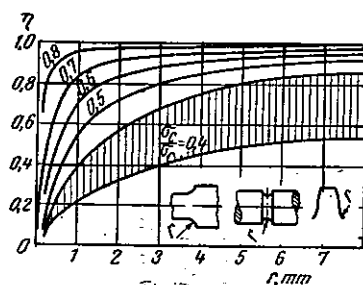


Fig. 4.41.

$\frac{\sigma_c}{\sigma_r}$ între limita de curgere și rezistența la rupere.

De asemenea, în tabela 4.9 se dau valori ale lui η pentru diferite calități de oțeluri. În cazurile cele mai defavorabile, în lipsa documentației referitoare la β_k și η , se va lua $\beta_k = \alpha_k$, ceea ce duce la un calcul acoperitor.

b. Cînd se cunoaște coeficientul efectiv de concentrare pentru încovoiere — folosind notația $\beta_\sigma = \beta_{k\sigma}$ — se poate calcula cel pentru răsucire, în lipsa unei documentații mai bune, cu relația

$$\beta_\tau = 1 + 0,6(\beta_\sigma - 1). \quad (4.15)$$

c. Este de subliniat observația importantă că β_k este bine să fie cunoscut chiar pentru dimensiunile reale ale piesei; în acest caz, în calcule nu mai intră și factorul dimensional. În caz contrar, β_k trebuie să fie determinat cel puțin pentru materialul piesei și forma concentratorului; trecerea la dimensiunile reale ale piesei se face introducînd în calcule și factorul dimensional ϵ .

d. Pentru montaje presate, se deosebesc două feluri de rezistențe la oboseală: una corespunzătoare producerii în piesă a unor eforturi unitare care vor cauza ruperea; cealaltă corespunzătoare începutului de formare a fisurilor. Coeficienții de concentrare dați anterior se referă la prima valoare a rezistenței la oboseală.

e. Valorile coeficienților de concentrare descriși se referă la epruvete bine lustruite, fără tratamente superficiale, lucrînd în aer, la temperatura de 20 °C. Influența acestor factori va fi examinată, în continuare, la cap. 4 și 5.

Tabela 4.9

Valori ale coeficientului de sensibilitate η pentru unele materiale

Materialul	η
OL38, recopt	0,4—0,7
OL50, recopt	0,5—0,85
OL70, recopt	0,55—0,85
35CN15, 35CN25, 30CN35, recopt	0,65—0,75
35CN25, 30CN35, îmbunătățit	0,8—0,95
Oțel de arc, îmbunătățit, cu $\sigma_r = 110 \text{ kgf/mm}^2$	0,95—1,0
Oțeluri austenitice	0,1—0,35
Aliaje ușoare, forjate și laminate	Ca la oțel carbon
13CO4	0,7—0,8

Observație. Datele sînt din literatura germană. S-au adaptat pe baza tabelor de echivalență STAS-DIN.

f. Cele mai sigure valori ale coeficienților de concentrare (incluzînd și factorul dimensional) se obțin prin încercări la oboseală efectuate chiar asupra piesei reale. Se recomandă ca, ori de cîte ori este posibil, să se facă încercări la oboseală asupra piesei reale. Desigur, acest lucru este posibil pentru o fabricație de serie, din care se poate sacrifica un număr de piese, nu însă pentru piese mari, unicate.

4.3. DIMENSIUNILE EPRUVETEI

4.3.1. Scăderea rezistenței la oboseală o dată cu creșterea dimensiunilor

Experiență arată că rezistența la oboseală scade o dată cu creșterea piesei, fenomenul putînd fi măsurat prin factorul dimensional ϵ , ϵ_k , definit prin relațiile (4.6), (4.7).

S-au căutat numeroase explicații ale acestui fenomen. *Teoria statistică* (Frenkel-Kontorova și Weibull) atribuie acest lucru probabilității mai mari de existență a defectelor interne și microfisurilor la piesele mari decât la cele mici. *Teoria energetică* (E. M. Șevandin, I. A. Razov, B. N. Serpeninov) susține că apariția primei fisuri este independentă de dimensiunile piesei, însă viteza de propagare a fisurii este cu atât mai mare cu cât energia acumulată de piesă este mai mare; la rândul său, energia crește o dată cu dimensiunile piesei.

În studiul factorului dimensional apar greutăți datorite faptului că epruvetele de diferite dimensiuni nu pot fi puse în condiții identice în ceea ce privește ceilalți factori care condiționează rezistența la oboseală (locul de prelevare a epruvetelor din materialul brut, prelucrarea etc.). De aceea, studiul asupra efectului dimensional nu este astăzi încă complet elucidat. Date interesante asupra problemei se găsesc în lucrările [4], [25], [31], [34], [38], [41], [57], [75], [77], [80], [87], [92].

4.3.2. Valori ale factorului dimensional

a. Pentru arbori de oțel. În fig. 4.42 se dau valorile factorului dimensional ϵ , pentru solicitări de încovoiere și răsucire, la bare de oțel de secțiune circulară. Curba 1 se referă la oțel carbon cu $\sigma_r = 40 \dots 50 \text{ kgf/mm}^2$, iar curba 2 la oțel aliat cu $\sigma_r = 120 \dots 140 \text{ kgf/mm}^2$. Pentru alte calități de oțel, se poate interpola între cele două curbe. Experiențele ce au dus la construirea

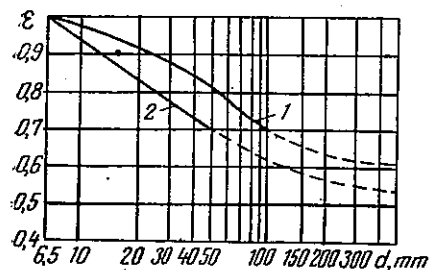


Fig. 4.42.

curbelor din fig. 4.42 au avut ca bază rezistențele la oboseală determinate pe epruvete cu $d_0 = 6,5 \text{ mm}$ [75].

În fig. 4.43 se dau valorile lui ϵ , pe baza cercetărilor lui Serensen, pentru arbori solicitați la încovoiere: curba 1 — oțel carbon, fără concentrări de eforturi unitare; curba 2 — oțel aliat fără concentrări și oțel carbon cu concentrări

slabe; curba 3 — oțel aliat cu concentrări moderate; curba 4 — oțel aliat cu concentrări foarte mari.

Examinarea diagramelor din fig. 4.42 și 4.43 arată că efectul dimensional este mult mai pronunțat la oțeluri aliate decât la oțeluri carbon, respectiv mai puternic la piesele cu concentratori decât la cele fără concentratori.

În fig. 4.44 se dau valorile lui ϵ pentru montaje presate. Curba 1 dă valorile lui ϵ , iar curba 2 — valorile rezistenței la oboseală σ_{-1} a arborelui [80]. Determinările s-au făcut pentru OL 50.

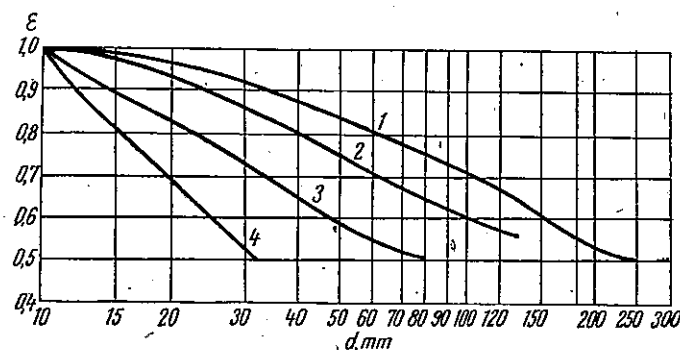


Fig. 4.43.

În lipsa unor date mai complete, valorile din fig. 4.42, 4.43 se pot folosi atât pentru încovoiere, cât și pentru răsucire, eventual chiar pentru piese de bronz.

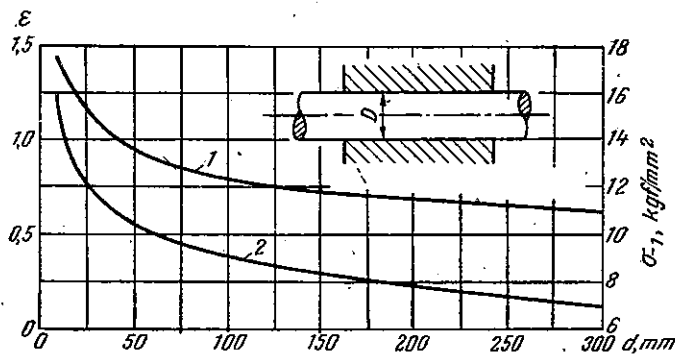


Fig. 4.44.

b. Pentru șuruburi din oțel, factorul dimensional ϵ se va lua din fig. 4.45. Diagrama este corectă pentru solicitări de întindere-compresiune, și relativă, pentru încovoiere. Ea poate fi folosită și pentru montaje presate.

c. Pentru piese din fontă. La solicitări de încovoiere, valorile lui ϵ se iau din fig. 4.46; curba 1 — piese fără concentratori;

curba 2 — cu concentratori avînd $\beta_k \leq 1,2$; curba 3 — cu concentratori avînd $\beta_k > 1,2$. Pentru solicitări de răsucire se folosește fig. 4.47, în care curba 1 se referă la piese fără concentratori, iar curba 2, la piese cu concentratori.

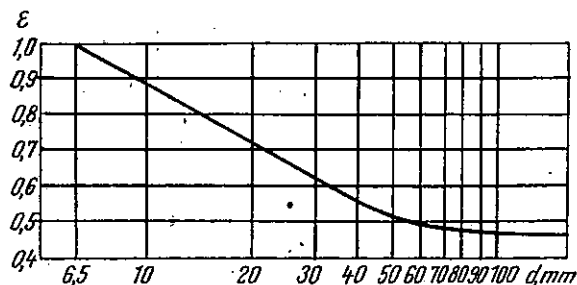


Fig. 4.45.

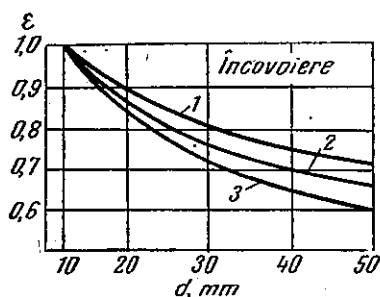


Fig. 4.46.

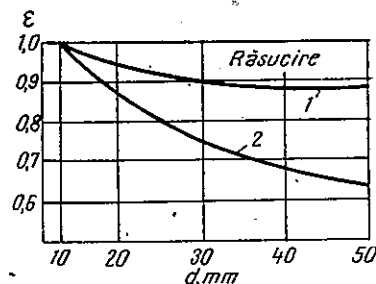


Fig. 4.47.

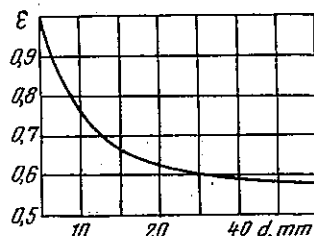


Fig. 4.48.

d. Pentru piese din aliaje ușoare, solicitate la încovoiere sau răsucire, factorul dimensional este dat de fig. 4.48.

4.3.3. Relații de calcul

Cunoscînd coeficienții de concentrare β_k , determinați în special pe epruvete standardizate, de diametru $d_0 = 7 \dots 10$ mm, precum și factorii dimensionali, se pot calcula coeficienții de concentrare pentru piesa reală

$$\beta_{kP} = \frac{(\sigma_{-1})_{d_0}}{(\sigma_{-1})_{kP}} = \frac{(\beta_k)_{d_0}}{\epsilon_k} = \frac{(\beta_k)_{d_0}}{\epsilon} \quad (4.16)$$

În această relație s-au notat:

- β_{kP} — coeficientul de concentrare al piesei reale, inclusiv factorul dimensional;
- $(\sigma_{-1})_{d_0} = \sigma_{-1}$ — rezistența la oboseală a materialului, determinată pe epruvete standardizate;
- $(\sigma_{-1})_{kP}$ — rezistența la oboseală a piesei reale, mai mică decît a epruvetei standardizate, din cauza existenței concentratorilor și a factorului dimensional;
- $(\beta_k)_{d_0}$ — coeficientul efectiv de concentrare, determinat pe epruvete standardizate, cu $d_0 = 7 \dots 10$ mm;
- ϵ_k sau ϵ — factorul dimensional.

În mod uzual se alege valoarea lui $(\beta_k)_{d_0}$ din graficele arătate la § 4.2 și valoarea lui ϵ pe baza diagramelor de la § 4.3 și se determină coeficientul de concentrare real al piesei β_{kP} .

Calculul se complică dacă, așa cum se întîmplă adeseori, coeficientul efectiv de concentrare din tabele este determinat pe epruvete de diametru $d_1 > d_0$ (de exemplu $d_1 = 40 \dots 50$ mm), pe cînd factorul dimensional are ca bază ($\epsilon = 1$) epruveta standardizată, cu $d_0 = 7 \dots 10$ mm. În acest caz, coeficientul β_{kP} se determină cu relația

$$\beta_{kP} = (\beta_k)_{d_1} \frac{(\epsilon_k)_{d_1}}{(\epsilon_k)_d \cdot (\epsilon)_{d_1}}, \quad (4.17)$$

în care:

- $(\beta_k)_{d_1}$ este coeficientul de concentrare, luat din grafice, determinat pe epruvete cu $d_1 > d_0$;
- $(\epsilon_k)_{d_1}$ — factorul dimensional pentru diametrul d_1 , ținînd seamă de existența concentratorului;
- $(\epsilon_k)_d$ — factorul dimensional pentru diametrul real d al piesei, ținînd seamă de concentrator;
- $(\epsilon)_{d_1}$ — factorul dimensional pentru diametrul d_1 , fără a ține seamă de concentrator.

Cînd graficul de care dispunem nu are valori diferite pentru ϵ și ϵ_k , în relația (4.17) se face simplificarea $(\epsilon_k)_{d_1} = (\epsilon)_{d_1}$ și ea devine

$$\beta_{kP} = \frac{(\beta_k)_{d_1}}{(\epsilon)_d} \quad (4.18)$$

Exemplul 4.1. Să se determine coeficientul efectiv de concentrare pentru un arbore din oțel, cu $\sigma_r = 60 \text{ kgf/mm}^2$, avînd un concentrator de forma din fig. 4.4, la care se cunosc $d = 80 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$, $r = 6 \text{ mm}$, solicitarea fiind de încovoiere [38]. La raportul $\frac{r}{d} = \frac{6}{80} = 0,075$ și pentru $\frac{D}{d} = 2$, pe curba de jos a fig. 4.4 se găsește $(\beta_k)_{d_1} = 1,75$. Curba se referă la oțel cu $\sigma_r = 50 \text{ kgf/mm}^2$, deci apropiat de al piesei ce se studiază. Întrucît piesa are raportul $\frac{D}{d} = \frac{100}{80} = 1,25$, de pe curba din fig. 4.11 se găsește $\xi = 0,84$, iar prin aplicarea relației (4.8) se află noua valoare a coeficientului de concentrare

$$(\beta_k)_{d_1} = 1 + 0,84(1,75 - 1) = 1,63.$$

Curbele din fig. 4.4 sînt valabile pentru $d_1 = 30 - 50 \text{ mm}$, în medie $d_1 = 40 \text{ mm}$. Luînd $d_1 = 40 \text{ mm}$ și $d = 80 \text{ mm}$ (diametrul piesei), din fig. 4.43 se găsește:

- pe curba 2, la $d_1 = 40 \text{ mm}$: $(\epsilon_k)_{d_1} = 0,80$;
- pe curba 2, la $d = 80 \text{ mm}$: $(\epsilon_k)_d = 0,65$;
- pe curba 1, la $d_1 = 40 \text{ mm}$: $(\epsilon)_{d_1} = 0,87$.

Prin aplicarea formulei (4.17) se găsește coeficientul de concentrare al piesei

$$\beta_{kP} = 1,63 \cdot \frac{0,80}{0,65 \cdot 0,87} = 2,31.$$

În cazul cînd s-ar fi aplicat relația simplificată (4.18) se găsea

$$\beta_{kP} = \frac{1,63}{0,73} = 2,20,$$

în care $(\epsilon)_d = 0,73$ s-a luat de pe curba 1 din fig. 4.42 sau curba 1 din fig. 4.43, care nu mai iau în considerare efectul de concentrare. Se vede că valorile obținute diferă una de alta numai cu 5%.

4.4. PRELUCRAREA ȘI STAREA SUPRAFEȚEI

Experiențele făcute în vederea stabilirii rezistenței la oboseală au arătat că unul din factorii esențiali este starea suprafeței. Acest lucru se datorește unei serii de cauze, și anume:

1. a. La suprafață se produc eforturile unitare maxime în piesele solicitate la încovoiere și răsucire; același lucru în piesele solicitate la întindere, dacă au concentratori.
 2. b. Suprafața are totdeauna zgîrieturi datorite prelucrării mecanice. Acestea constituie microfisuri, care pot amorsa ruperea. Cît cît suprafața are asperități mai mari, microrelieful prezintă concentratori de eforturi unitare mai puternici.
 3. c. Prin prelucrarea mecanică, grăunții cristalini sînt în parte distruși, ceea ce constituie puncte slabe ale materialului.
 4. d. În apropierea suprafeței se produc, datorită prelucrărilor mecanice, tensiuni interne, care au adeseori efect favorabil, uneori însă defavorabil.
 5. e. La suprafață, se manifestă și acțiunea corosivă a aerului. Studiile făcute au arătat că factorul esențial ce condiționează rezistența la oboseală, din punctul de vedere al stării suprafeței, este gradul de prelucrare, finețea suprafeței. Valorile standardizate ale rezistențelor la oboseală sînt determinate pe epruvete prelucrate prin lustruire pe cale mecanică. Operația de lustruire, pe lângă reducerea la minimum a asperităților, realizează și o ecruisare superficială, cu efect favorabil. Lustruirea electrolică duce la rezistențe la oboseală mai mici decît cea mecanică, pe de o parte, deoarece ea nu produce efectul de ecruisare, iar pe de altă parte, deoarece, prin încălzire, ea anulează și tensiunile interne favorabile, datorite prelucrărilor mecanice anterioare.
 6. În operația de rectificare (șlefuire) se produc pe suprafața piesei rizuri, a căror mărime depinde de natura pietrei de șlefuit și a materialului piesei. Cînd sînt dese și fine, aceste rizuri sînt mai puțin periculoase decît cele rare și adînci. La piesele strunjite, calitatea suprafeței și deci rezistența la oboseală depind de parametrii operației de strunjire: cuțitul, adîncimea așchii, vitezele de așchiere și avans etc.
- Date interesante asupra efectului prelucrărilor mecanice în ce privește rezistența la oboseală se găsesc în lucrările [28], [41], [44], [57], [63]. Este bine ca acestea să fie în atenția proiectanților și tehnologilor, în vederea asigurării unor parametri cît mai ridicați ai produselor.
- Efectul stării suprafeței, respectiv al gradului de prelucrare (rugozității), poate fi luat în considerare în calculul de oboseală,

prin introducerea unui *coeficient de calitate a suprafeței*, γ , sub-unitar, definit ca raport între rezistența la oboseală a piesei cu suprafața avînd un grad de prelucrare oarecare (σ_{-1p}) și cea a piesei lustruite (σ_{-1}):

$$\sigma_{-1p} = \gamma \cdot \sigma_{-1}$$

(4.19)

Acest coeficient poartă, în literatura tehnică, denumiri variate: β — în lucrările [38], [68], [75]; δ — în lucrarea [14]; ϵ_n — în lucrarea [57]; γ — în lucrarea [56]; K_4 — în lucrarea [55]; b_2 — în lucrarea [24]; α — în lucrarea [80]. Și în acest caz ar fi util ca, prin standardizarea internațională, să se găsească un simbol unitar.

În fig. 4.49 se dau valorile lui γ , pentru piese de oțel solicitate la încovoiere: curba 1 — lustruit; curbele 2 — șlefuit; curba 3 — finisat prin strunjire; curbele 4 — degroșat prin strunjire; curba 5 — piese cu concentrator inelar; curba 6 — cu crustă de laminare; curba 7 — coroziune în apă dulce; curba 8 — coroziune în apă de mare [80]. Pentru orientare în aprecierea gradului de prelucrare, s-a dat și rugozitatea suprafeței, măsurată în microni. Examinarea fig. 4.49 arată că efectul stării suprafeței se

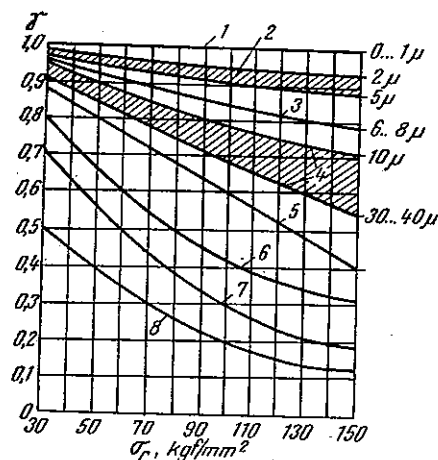


Fig. 4.49.

accentuează o dată cu creșterea rezistenței oțelului; de asemenea se vede ce mult scade rezistența la oboseală la piesele strunjite, față de cele lustruite sau șlefuite și cât de mare este efectul agenților corosivi.

Din cele arătate mai înainte, rezultă că în asigurarea rezistenței la oboseală a unei piese interesează mai puțin înlocuirea unui material slab prin unul mai bun, cât mai ales asigurarea calității suprafeței. Studii numeroase, făcute în ultimii 10—20 ani, au arătat că o serie de procedee tehnologice pot îmbunătăți sensibil proprietățile suprafeței pieselor, din punctul de vedere al rezistenței la oboseală. S-a născut astfel o tehnologie nouă, de îmbunătățire a calității suprafeței, ale cărei metode vor fi analizate în detaliu la cap. 5.

Coeficienții din fig. 4.49 se referă în special la piese solicitate la încovoiere, putînd fi aplicați și celor solicitate la întindere. Pentru piese solicitate la răsucire, coeficientul de calitate se poate determina cu relația

$$\gamma_r = 0,6\gamma_o + 0,4$$

(4.20)

în care valorile γ_o sînt date de fig. 4.49.

Pentru alte materiale decît oțelul, cîteva valori ale coeficienților de calitate sînt următoarele:

- piese strunjite, din duraluminu: $\gamma = 0,85 \dots 0,90$;
- piese strunjite, din aliaj de magneziu $\gamma = 0,7 \dots 0,8$;
- piese din aliaje ușoare, cu cruste de turnare, urme de presare sau laminare $\gamma = 0,50 \dots 0,75$;
- piese sablate sau tuate $\gamma = 0,8 \dots 1$;
- piese decapate după sablare $\gamma = 0,85 \dots 1$.

4.5. ACȚIUNEA AGENȚILOR COROSIVI ȘI A ABSORBȚIEI MEDIILOR ACTIVE

S-a constatat că rezistența la oboseală se micșorează considerabil dacă piesa respectivă lucrează într-un mediu corosiv. Sub acest nume se înțelege o serie de agenți, al căror efect chimic sau electrochimic produce o distrugere lentă a materialului, începînd de la suprafață: aerul (datorită oxigenului, umezelii etc.), vaporii de apă sau de diferiți acizi, apa dulce, apa acidulată, acizii, apa sărată, medii în care circulă curenți electrici etc.

Efectul agenților corosivi asupra rezistenței la oboseală a fost studiat mult, atît în ce privește efectul propriu-zis al coroziunii, cît și în ce privește mijloacele de combatere a ei.

Efectul corosiv se manifestă în special prin atacarea suprafeței piesei, ceea ce duce la producerea de concentratori puternici, micșorînd rezistența la oboseală. Efectul este atît de puternic, încît se dă o denumire proprie, de *rezistență la oboseală prin coroziune*, rezistenței piesei în astfel de medii. S-a constatat că materialele care, în cazul solicitărilor statice, sînt neatacate de agenții corozivi — oțelurile inoxidabile — suferă puternic în urma solicitării variabile. Faptul se explică prin formarea, în jurul piesei, a unui strat protector în cazul solicitării statice, care nu poate subsista la solicitarea variabilă.

La coroziunea în apă dulce, s-a constatat că efectul defavorabil crește cu durata în care piesa a stat în apă, în repaus, anterior încercării la oboseală.

Încercările în mediu corosiv arată că, chiar la oțeluri, nu mai există un traseu orizontal al curbei lui Wöhler; deci rezistențele

Influența diferiților agenți corosivi asupra

Materialul	Compoziția chimică	Starea materialului
Oțeluri carbon	0,06% C 0,14% C 0,16% C 0,26% C 0,30% C 0,45% C 0,70% C 1,09% C	Laminat Laminat Recopt Recopt Recopt Recopt Imbunătățit Imbunătățit
Oțeluri aliate	0,28% C; 1,50% Ni; 0,73% Cr 0,23% C; 3,70% Ni; 0,70% Cr 0,28% C; 3,70% Ni 0,33% C; 1,10% Cr; 0,12% V 0,15% Cu 0,47% C; 1,60% Si; 3,10% Ni	Imbunătățit Laminat Recopt Imbunătățit Imbunătățit
Oțeluri inoxidabile	0,39% C; 10,9% Cr; 34,7% Ni 0,38% C; 14,5% Cr 0,38% C; 14,5% Cr 0,19% C; 20,9% Cr	Normalizat Recopt Imbunătățit Normalizat
Oțeluri turnate	0,19% C 0,48% C 0,19% C; 12,4% Cr	— — Inoxidabil
Fonte	3,6% C; 1,75% Si; 0,50% Mn 3,4% C; 2,08% Si; 0,76% Mn 3,3% C; 1,52% Si; 0,86% Mn	— — —
Nichel	98,9% Ni	Recopt
Metal Monel	71% Ni; 26% Cu	Recopt
Aliaj nichel-cupru	78% Ni; 21% Cu	Recopt
Alamă	62,3% Cu; 37% Zn	Trasă la rece Recoptă
Bronz	91,7% Cu; 8,2% Sn 88,7% Cu; 7,5% Al; 2,9% Fe	Recopt. Tras la rece. Presat
Aluminiu	99,5% Al 99,5% Al	Recopt Tras
Duraluminu	3,7% Cu; 1,02% Si 4,2% Cu; 0,4% Mg; 0,34% Si	Imbunătățit Recopt
Silumin	13% Si; 0,5% Fe 12% Si; 0,8% Cu; 0,4% Fe	Turnat Turnat

Observație: Apa sărată este apă cu un conținut de 1/6 sare de mare.

rezistenței la oboseală a unor metale și aliaje [57]

Caracteristici mecanice in aer		Rezistențe la oboseală în mediu corosiv σ_{-1} kgf/mm ²			Baza N_B 10 ⁶ cicluri
σ_r kgf/mm ²	σ_{-1} kgf/mm ²	Apă dulce	Apă sărată	Apă de mare	
41,0	26,0	10,0	—	—	50
43,0	22,5	14,0	—	—	20
36,6	18,0	—	4,0	—	20
41,0	18,2	12,0	—	—	20
50,2	25,0	—	—	5,5	100
65,6	31,0	12,0	—	—	20
97,0	52,0	11,0	—	—	20
72,8	29,5	14,0	—	—	20
97,5	48,0	11,3	9,8	—	20
76,0	36,0	18,0	—	8,0	50
63,7	34,5	16,0	—	11,2	20
67,2	35,5	16,5	—	6,0	100
119	62,0	8,4	—	—	20
79,0	40,1	28,8	15,5	—	50
66,4	36,3	22,5	—	—	50
125	62,0	26,4	18,9	—	50
61,8	33,0	28,4	21,1	—	50
46,3	20,0	12,0	—	4,0	50
64,5	22,0	12,0	—	4,0	50
69,0	32,0	16,0	—	8,0	50
13,3	8,0	5,0	—	—	50
29,8	18,0	14,0	—	—	50
30,0	13,0	9,0	—	8,0	50
54,5	23,2	16,9	15,5	—	50
58,5	25,0	15,5	—	—	50
33,2	11,3	11,3	11,3	—	100
37,5	14,7	11,3	11,3	—	50
39,0	14,7	—	13,4	—	50
63,6	23,2	16,2	16,2	—	50
9,8	5,0	—	—	3,0	10
14,6	8,0	4,2	—	—	50
48,6	12,0	5,4	—	—	50
24,2	9,6	5,3	—	—	50
12,4	4,0	—	—	4,0	10
19,5	6,0	—	—	5,0	10

la oboseală sînt cu atît mai mici cu cît durata experimentării este mai mare. De aceea, baza N_B pentru încercări se ia mai ridicată decît la încercările în aer.

Încercările efectuate au arătat că rezistența la oboseală în mediu corosiv crește cu frecvența de aplicare a solicitării variabile. Acest lucru se vede din fig. 4.50, unde s-au dat, după

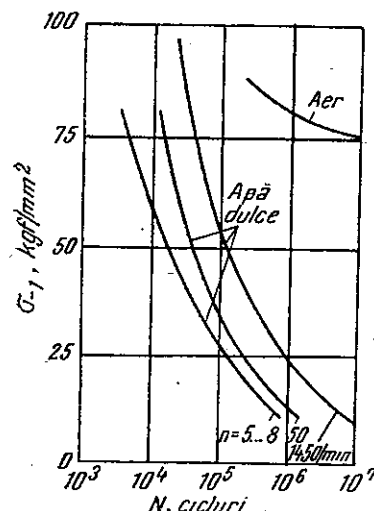


Fig. 4.50.

Mc Adam, rezistențele la oboseală în aer și în apă dulce (cu trei viteze de încercare) pentru un oțel cu Si-Ni, avînd $\sigma_r = 176 \text{ kgf/mm}^2$ [25].

În tabela 4.10 se dau, pentru o serie de metale și aliaje, rezistențele la oboseală în aer, apă dulce și apă sărată. Efectul corosiv apare în evidență din examinarea acestor cifre. Se observă că bronzul are rezistențe la oboseală egale în apă dulce și apă sărată — ultimele fiind superioare celor ale oțelului — motiv pentru care este folosit la fabricarea elicelor de nave maritime.

În calculele de oboseală, efectul agenților corosivi poate fi luat în considerare în două feluri:

— fie introducînd în calcul, ca proprietate a materialului, înșăși rezistența la oboseală a piesei în mediu corosiv σ_{-1p} ;

— fie, cînd σ_{-1p} nu se cunoaște, introducînd coeficientul de calitate al acțiunii mediului corosiv γ , subunitar, ca raport între σ_{-1p} și σ_{-1} , deci folosind relația (4.19).

Cîteva valori ale lui γ se găsesc pe curbele 7 și 8 din fig. 4.49. Alte valori, pentru oțeluri, se dau în fig. 4.51, și anume: curba 1 — apă dulce, piese cu concentratori; curba 2 — apă dulce, piese fără concentratori și apă de mare, piese cu concentratori; curba 3 — apă de mare, piese fără concentratori. Diagrama este valabilă pentru solicitări de încovoiere și răsucire. În fig. 4.52 se dau valorile lui γ , pentru piese de fontă, lucrînd în apă dulce.

Există o bibliografie amplă asupra efectului coroziunii și asupra protecției anticorosive. Se menționează, în special, publicațiile lui A. V. Riabencov [65], [89], ca și datele ample din lucrările [44], [41], [82], [86], [87].

Un mod aparte de efect corosiv, studiat amplu în ultimii ani, este efectul *absorbției mediilor active umede*. S-a constatat că, în mediu umed, metalele absorb hidrogen, care, intrînd în rețeaua atomică, produce un efect puternic de micșorare a rezistenței la

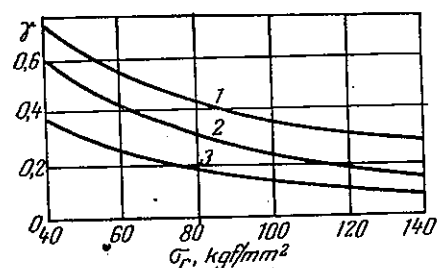


Fig. 4.51.

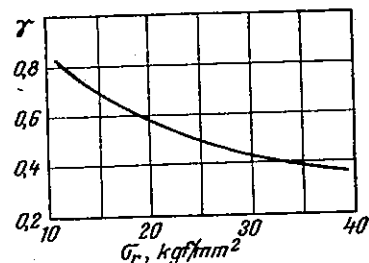


Fig. 4.52.

oboseală. Acest efect — numit efect Rebinder — este amplu studiat astăzi într-o serie de lucrări de specialitate, ca: [27], [37], [41], [63].

Efectele atît de dăunătoare ale agenților corosivi au obligat pe ingineri să caute mijloace de combatere. S-a născut astfel o tehnologie nouă — protecția anticorosivă — care reduce sensibil efectul agenților corosivi; ea va fi examinată la cap. 5.

4.6. TENSIUNILE REMANENTE

Modul de producere și acțiune a tensiunilor remanente (interne) poate fi explicat cu modelul din fig. 4.53, întocmit de H. Sigwart [25], [87]. În partea stîngă a figurii s-au considerat două plăci rigide, între care se găsesc două arcuri laterale, comprimate, și două centrale, întinse. Forțele din arcuri se echilibrează, așa că asupra sistemului nu acționează nici o forță exteroiară. Același lucru se poate întîmpla într-o piesă din material elastic, care, într-o parte a secțiunii, are eforturi unitare de întindere, iar în cealaltă parte, de compresiune, satisfăcînd relația $\int_A \sigma \cdot dA = 0$ care arată că bara nu este solicitată exterior. La modelul mecanic, forțele din arcuri pot fi determinate suprimînd unele din ele și măsurînd deformațiile pe care le iau celelalte. Similar, la piese cu tensiuni interne, efectuînd găuri de diametre

diferite, care suprimă o parte din material și măsurând deformările ce se produc în partea rămasă, se pot măsura tensiunile interne. De asemenea ele pot fi măsurate pe cale roentgenografică.

Existența tensiunilor remanente are, uneori, efect favorabil asupra rezistenței la oboseală. Astfel, distribuția din fig. 4.53 este favorabilă în piese solicitate la încovojere, întrucât în fibrele

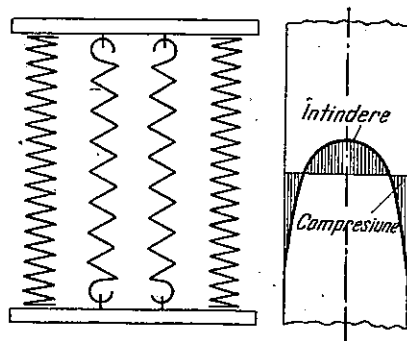


Fig. 4.53.

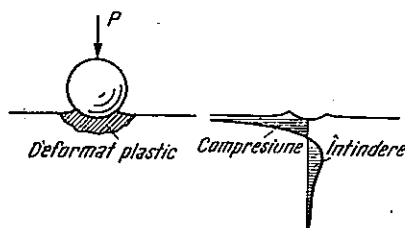


Fig. 4.54.

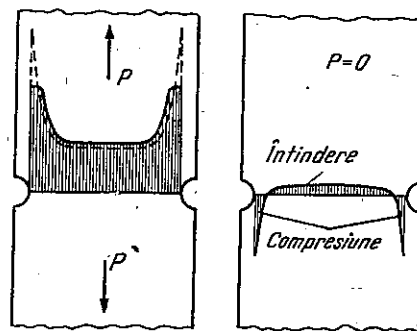


Fig. 4.55.

ține într-o bară cu concentrator, trasă la rece, așa fel ca în concentrator să se producă deformări plastice (fig. 4.55).

extreme, eforturile unitare de întindere — cele care condiționează ruperea prin oboseală — sînt micșorate prin existența tensiunilor interne de compresiune. Din contra, la o bară solicitată la întindere-compresiune, tensiunile interne din fig. 4.53 sînt defavorabile.

Tensiunile remanente pot apare în piesă din diferite motive :

a. În urma unor deformări plastice la rece. Fenomenul fizic se explică ușor cu ajutorul fig. 4.54 [25]. Dacă se presează o bilă pe suprafața unei piese, cu o forță suficient de mare, atunci în jurul ei se produc deformări plastice, pe cînd la o distanță mai mare deformările sînt elastice. În urma suprimării forței P , materialul solicitat elastic apasă asupra celui deformat plastic și cauzează, în jurul urmei lăsată de bilă, o zonă cu tensiuni remanente de compresiune. Dacă în locul bilei se folosește o rolă, care aplică acest tratament mecanic pe toată periferia unui concentrator, atunci întreaga zonă a acestuia va avea tensiuni remanente de compresiune favorabile. Un efect similar se obține într-o bară cu concentrator, trasă la rece, așa fel ca în concentrator să se producă deformări plastice (fig. 4.55).

Prelucrările mecanice prin așchiere produc de asemenea, în urma procesului de deformare plastică, eforturi unitare remanente de compresiune, în straturile superficiale ale pieselor.

b. Prin încălzire superficială, urmată de răcire bruscă, se produc tensiuni interne, cu efect favorabil asupra rezistenței la oboseală. În tabela 4.11 se arată rezultatele încălzirii epruvetelor de oțel, sub punctul critic inferior, urmată de răcire bruscă, pentru oțel avînd $\sigma_{-1} = 22 \text{ kgf/mm}^2$. Se constată măriri ale rezistenței la oboseală, care cresc cu temperatura de încălzire, pînă la 30%. În tabela 4.12 se arată rezultatele experiențelor făcute cu diferite tipuri de epruvete, din același material, încălzite la 600°C

Tabela 4.11

Variația rezistenței la oboseală a unui oțel cu 0,22 % C prin tratament termic [16]

Temperatura de încălzire înainte de răcire $^\circ\text{C}$	Limita de proporționalitate în stare încălzită σ_p kgf/mm^2	Rezistența la oboseală la încovojere după răcire σ_{-1} kgf/mm^2
650	12,0	28,5
550	15,2	26,5
450	24,0	24,5
Neîncălzit	25,0	22,0

Tabela 4.12

Rezistența la oboseală a unor epruvete din oțel cu $\sigma_r = 38,5 \text{ kgf/mm}^2$ și $\sigma_c = 23,9 \text{ kgf/mm}^2$ răcite lent și brusc [16]

Felul epruvetei	Răcirea de la 600°C s-a făcut	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm^2
Cilindrică, $\varnothing 10 \text{ mm}$	Lent Brusc, în apă	19,0 23,0
Cilindrică, $\varnothing 10 \text{ mm}$, cu o creștătură executată după tratamentul termic.	Lent Brusc, în apă	12,7 23,5
Cilindrică, $\varnothing 10 \text{ mm}$, cu o creștătură executată înainte de tratamentul termic.	Lent Brusc, în apă	12,3 21,9
Cilindrică, $\varnothing 12 \text{ mm}$, cu rulment presat pe ea	Lent Brusc, în apă	15,2 21,0
Filetată, după tratament, prin strunjire, $d = 12 \text{ mm}$, $d_1 = 10 \text{ mm}$	Lent Brusc, în apă	13,2 17,8

și răcite, unele lent, altele brusc, în apă. Se constată, la epruvetele răcite brusc, creșteri ale rezistenței la oboseală, de 21—85% față de cele răcite lent.

Amănunte interesante asupra efectului tensiunilor remanente se găsesc în lucrările [16], [25], [33], [41], [64], [84], [87]. Problema va fi reluată la cap. 5, deoarece tratamentele de îmbunătățire a rezistenței la oboseală se bazează, în mare măsură, tocmai pe producerea tensiunilor remanente.

4.7. TEMPERATURA

În ultima vreme, turbina cu gaze a luat o dezvoltare puternică în construcțiile de avioane; ea caută să-și facă loc și în construcția de locomotive, automobile sau motoare stabile. Principalul impediment ce a frânat dezvoltarea turbinei cu gaze a fost găsirea unor aliaje refractare, care să aibă proprietăți mecanice ridicate la temperaturi înalte. De aceea, dezvoltarea turbinei cu gaze, în special în aviație, a fost precedată de un lung șir de cercetări asupra fluajului și oboselii materialelor folosite. Principalele piese care necesită studii asupra oboselii la temperaturi înalte sînt paletelile turbinelor cu gaze și cu abur. Separat, construcția mașinilor frigorifice a ridicat și problema studiului oboselii la temperaturi foarte joase.

În studiul oboselii la temperaturi înalte, se poate face o separare a scării temperaturilor în trei domenii, ale căror limite depind de aliajul studiat: domeniul temperaturilor moderate, în care studiul oboselii este analog celui la temperatura normală; domeniul temperaturilor înalte, în care studiul oboselii se face legat de cel al fluajului; domeniul temperaturilor foarte înalte, în care ruperea are loc datorită fluajului.

Fenomenul de fluaj se manifestă în mod diferit, după coeficientul de asimetrie al ciclului: la cicluri simetrice, unde deformările schimbă mereu de semn, practic nu se manifestă fluajul; la cicluri asimetrice, valoarea σ_m a ciclului reprezintă un efort unitar static, care cauzează deformări de fluaj. Materialele folosite în construcția paletelor de turbine sînt solicitate în special la cicluri asimetrice de întindere, ceea ce face ca studiul oboselii să fie combinat cu al fluajului. Astfel de studii se fac stabilind relații între rezistența la oboseală și limita de fluaj. Adeseori, însăși curba lui Wöhler se reprezintă luînd pe orizontală timpul, în locul numărului de cicluri.

Curba lui Wöhler prezintă o serie de particularități, unele dintre ele similare încercărilor în mediu corosiv. Astfel, ea nu

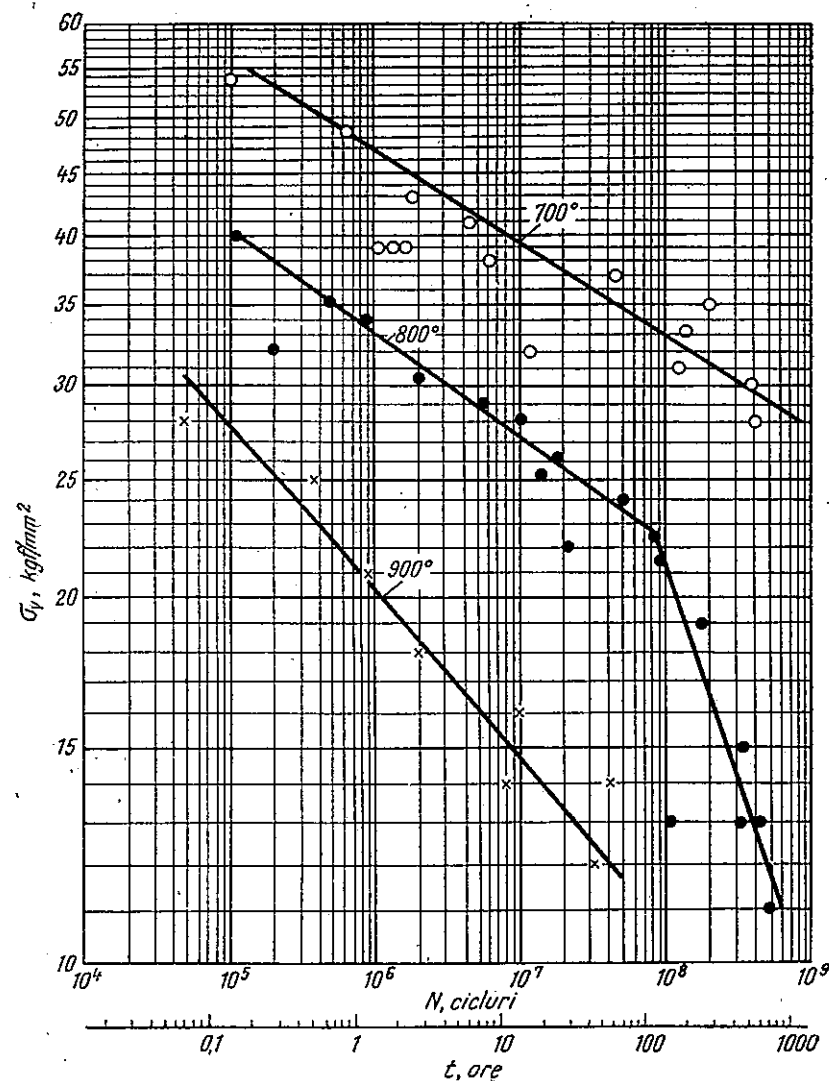


Fig. 4.56.

are traseu orizontal, ci coboară mereu cu o pantă cu atât mai accentuată cu cât temperatura este mai mare. Exemplu sînt curbele din fig. 4.56, ale unui oțel refractar, pentru temperaturi de 700, 800, 900°C. Neavînd traseu rectiliniu, este nevoie a se fixa o

bază pentru încercări : aceasta se ia destul de ridicată, de exemplu $N_B = (40 \dots 100) 10^6$ cicluri, uneori chiar $1000 \cdot 10^6$. Adeseori, timpul-cît durează încercările se ia în funcție de durata în serviciu a materialului studiat.

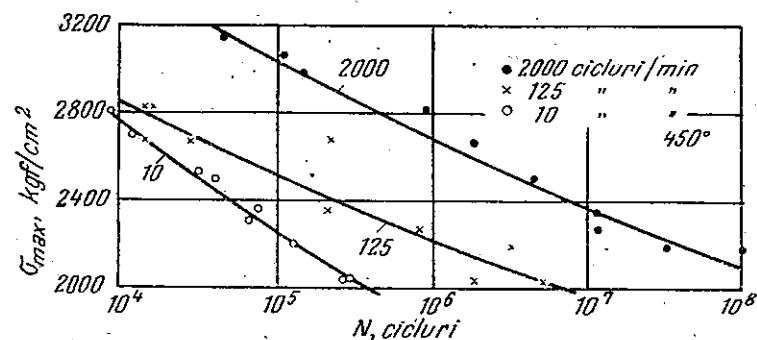


Fig. 4.57.

O altă particularitate este că la temperaturi înalte mărimea rezistenței la oboseală depinde sensibil de frecvența cu care variază sarcina, crescînd o dată cu frecvența. Un exemplu este dat în fig. 4.57, după cercetările făcute de P. G. Forrest și H. J. Tapsell : încercările se referă la un oțel, la 450 °C, cu frecvența de 10, 125 și 2000 cicluri pe minut. Fenomenul se explică prin

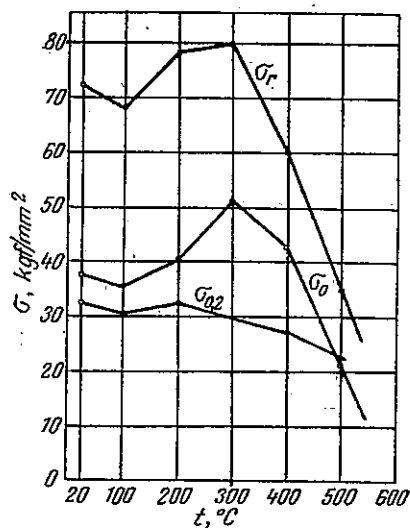


Fig. 4.58.

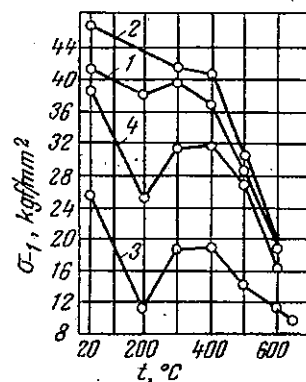


Fig. 4.59.

aceea că cu cît frecvența este mai joasă cu atît încercarea durează mai mult și ca urmare efectele de fluaj sînt mai accentuate. Acest efect apare la încercări prin ciclu asimetric, unde existența lui σ_m cauzează fluajul.

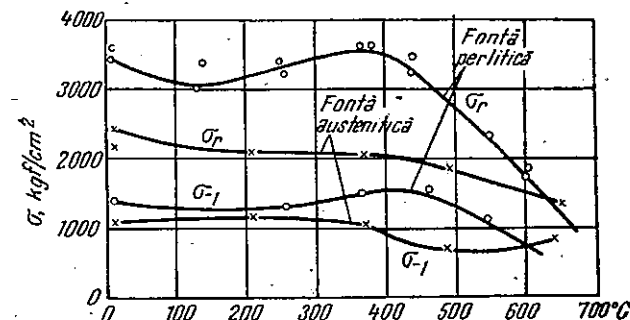


Fig. 4.60.

În ce privește rezistența la oboseală, ea variază cu temperatura după legi asemănătoare rezistenței de rupere statice. În fig. 4.58 se arată variația rezistenței de rupere σ_r , a limitei de curgere $\sigma_{0.2}$ și a rezistenței la oboseală prin ciclu pulsator, pentru un oțel cu 0,58% C, normalizat [24]. Se vede că la oțelul carbon proprietățile de rezistență încep să scadă de la 300 °C.

În fig. 4.59 se dau [41] rezistențele la oboseală ale oțelului 30 HM (oțel aliat, după GOST), funcție de temperatură, pentru patru feluri de epruvete: 1 — epruvete netede neîntărite; 2 — epruvete netede întărite prin rulare; 3 — epruvete cu concentratori, neîntărite; 4 — epruvete cu concentratori rulate.

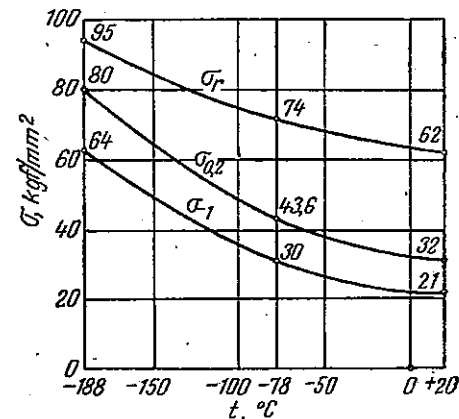


Fig. 4.61.

În fig. 4.60 se dau rezistențele de rupere și de oboseală, în intervalul de temperaturi de la 20 pînă la 600 °C, pentru fonte perlitice și fonte austenitice [57]. În fig. 4.61 se dă variația

rezistențelor σ_r , $\sigma_{0,2}$ și σ_{-1} , pentru un oțel cu 0,35% C, în domeniul temperaturilor joase; se observă că rezistența de rupere crește cu circa 50% pentru intervalul de temperatură de la +20°C pînă la -188°C, pe cînd rezistența la oboseală crește cu 200%

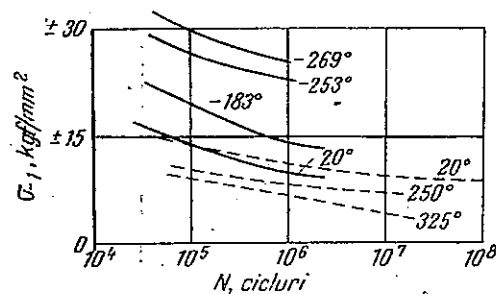


Fig. 4.62.

Date numeroase asupra proprietăților de oboseală ale metalelor la temperaturi înalte se găsesc în lucrările. [15], [41], [59], [82], [84], [86], [87].

4.8. FRECVENȚA DE APLICARE A SOLICITĂRII VARIABILE

Intrucît în construcțiile de mașini au loc solicitări variabile de diferite frecvențe — funcție de turația mașinii, de armonica cu care vibrează piesa — studiul dependenței rezistenței la oboseală de frecvență prezintă deosebit interes.

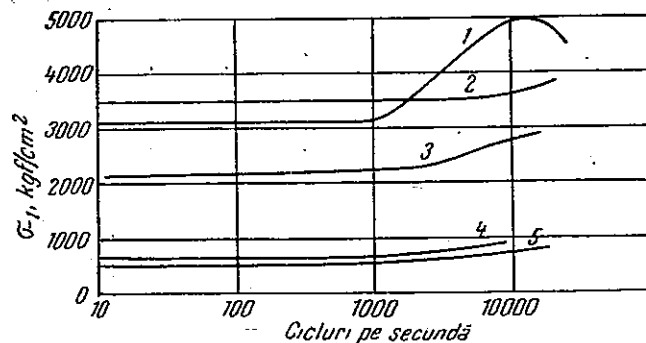


Fig. 4.63.

S-a arătat, în paragrafele anterioare, că la încercările în mediu corosiv, ca și la cele la temperaturi înalte, rezistența la oboseală crește sensibil cu frecvența; în aceste încercări era vorba

de frecvențele uzuale ale mașinilor de încercat. Pentru încercările în aer, după Serensen, rezistențele la oboseală sînt practic invariabile cu frecvența de încercare, pînă la 1 000 Hz, dar prezintă creșteri în domeniul frecvențelor foarte înalte. Acest lucru se vede în fig. 4.63, în care: curba 1 se referă la oțel carbon cu 0,06% C; curba 2 — oțel cu 0,11% C; curba 3 — oțel cu 0,11% C recopt; curba 4 — cupru; curba 5 — aluminiu.

Încercări făcute cu aliaje de titan au arătat că la frecvențe foarte înalte are loc o scădere a rezistenței la oboseală, datorită încălzirii puternice; făcînd răcirea epruvetelor, s-a constatat o sporire a rezistenței la frecvențele foarte mari.

4.9. VARIATIA MĂRIMII SOLICITĂRII VARIABILE

În piese de mașini, în afara solicitărilor variabile obișnuite, produse la funcționarea de regim, pot apare, în anumite ocazii, solicitări variabile de amplitudine mai mare decît rezistența la oboseală și durată relativ redusă, cărora li s-a dat numele de *suprasolicitări*. Astfel de suprasolicitări iau naștere la motoare în timpul demarajului, la autovehicule în timpul mersului în pantă, pe curbă sau în viteza I, la osiile vagoanelor cînd roțile trec peste rosturile șinelor etc. Studiul rezistenței la oboseală în condiții de suprasolicitări, efectuat în laboratoare, caută să apropie cercetarea cît mai mult de condițiile reale de solicitare.

Cercetările efectuate pînă acum au arătat că, funcție de mărimea și durata lor de aplicare, suprasolicitările pot fi *favorabile*, *dăunătoare* sau *fără efect nefavorabil*.

a. **Suprasolicitări favorabile.** Sînt favorabile, adică duc la creșterea rezistenței la oboseală, suprasolicitările de valoare superioară rezistenței la oboseală și durată foarte mică. În primul rînd, la piese cu concentratori, o solicitare statică inițială, depășind în concentrator limita de curgere, produce tensiuni interne care măresc rezistența la oboseală, cum s-a arătat în fig. 4.55. Un efect similar se obține și cînd această solicitare devine ciclică și se aplică de un număr redus de ori. Pe măsură ce numărul de cicluri de aplicare a suprasolicitării crește, efectul favorabil produs prin ecruisare este înlocuit prin efectul defavorabil al fenomenului de oboseală.

b. **Suprasolicitări dăunătoare.** Pe durată mai lungă, suprasolicitările sînt dăunătoare, adică duc la micșorarea rezistenței la oboseală. Acestui fenomen i se dă numele de *deteriorare* a materialului. Deteriorarea este funcție de *mărimea* și *durata* de

aplicare a suprasolicitării. În general există două metode de cercetare a efectului defavorabil al suprasolicitării: fie se aplică suprasolicitări de diferite mărimi, pe o durată constantă, fie se aplică o suprasolicitare de mărime constantă, pe durate diferite. Tehnica de experimentare este următoarea: se aplică întregii serii de epruvete care servesc la construirea curbei lui Wöhler suprasolicitarea de aceeași mărime și durată dată, după care urmează tehnica cunoscută de încercare la oboseală, care duce la construirea curbei lui Wöhler.

În fig. 4.64 se arată variația rezistenței la oboseală prin ciclu simetric a unui oțel avînd $\sigma_{-1} = 22 \text{ kgf/mm}^2$, căruia i s-au aplicat suprasolicitări prin ciclu simetric, pe durată a $N = 10^5$ cicluri, cu diferite amplitudini $\sigma_{max} = \sigma_v$. Se vede că rezistența la oboseală scade repede cu creșterea suprasolicitării. În fig. 4.65 se arată cum se schimbă curba lui Wöhler, deci cum scade rezistența la oboseală a unui oțel carbon cu $\sigma_{-1} = 22 \text{ kgf/mm}^2$, dacă i se aplică suprasolicitarea prin ciclu simetric $\sigma_{max} = 32 \text{ kgf/mm}^2$, pe diferite durate: curba 1 se referă la materialul fără suprasolicitări; curba 2 — pentru $0,5 \cdot 10^4$ cicluri de suprasolicitare; curba 3 — pentru $1 \cdot 10^4$; curba 4 — pentru $1,5 \cdot 10^4$; curba 5 — pentru $2 \cdot 10^4$; curba 6 — pentru $2,5 \cdot 10^4$ cicluri de suprasolicitări. Se constată, la ultima curbă, o scădere de 27% a rezistenței la oboseală, față de materialul care n-a fost suprasolicitat. Efectul defavorabil al suprasolicitării, înainte de a se produce fisurarea, poate fi anulat printr-un tratament de recoacere a piesei.

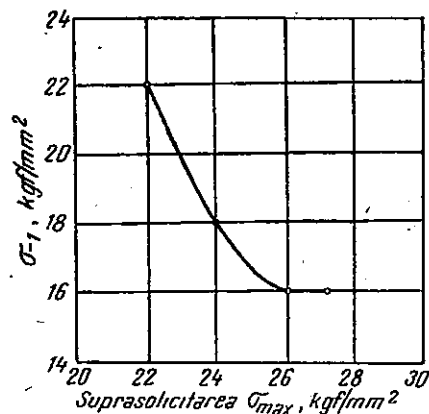


Fig. 4.64.

c. Suprasolicitări fără efect nefavorabil (suprasolicitări nepericuloase). Studiul efectului suprasolicitărilor, în modul descris mai sus, necesită experiențe îndelungate. S-a constatat însă că suprasolicitările, pînă la anumite mărimi și durate, sînt nepericuloase. Determinînd aceste limite, pentru diferite numere de cicluri N , se poate trasa o curbă a suprasolicitărilor nepericuloase, pe aceeași figură cu curba de oboseală a materialului fără

suprasolicitări. Procedul de construire a acestei curbe — linia DB din fig. 4.66 — este următorul [57]:

Se pornește de la un număr de cicluri oarecare ales N_I . Se supraîncarcă prima epruvetă pe durată a N_I cicluri, cu un efort

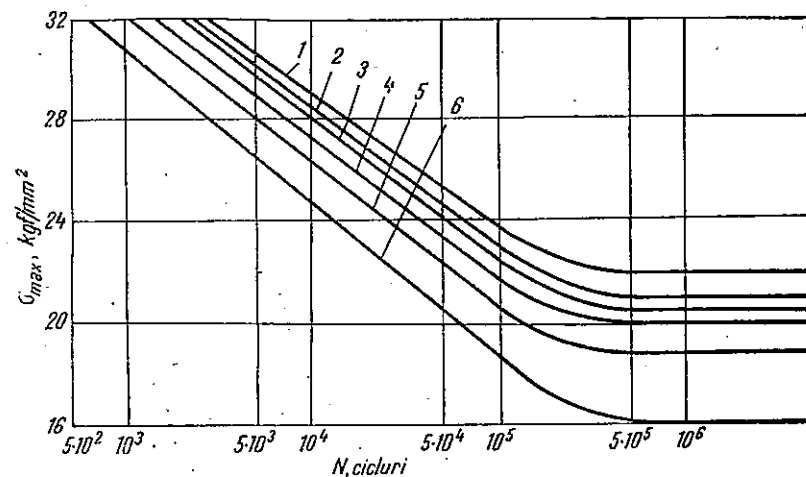
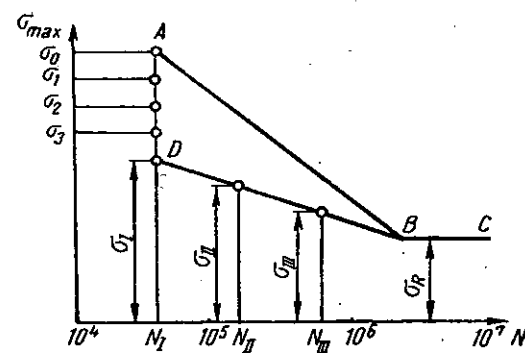


Fig. 4.65.

unitar maxim al ciclului $\sigma_{max} = \sigma_1$, unde σ_1 este cu ceva inferior valorii σ_0 cu care a început trasarea curbei lui Wöhler. Se încearcă apoi această epruvetă la valoarea rezistenței la oboseală σ_R și dacă ea s-a rupt înainte de 10^7 cicluri, înseamnă că suprasolicitarea a fost periculoasă. Se repetă încercările, analog, la epruvetele următoare, cu suprasolicitările $\sigma_2 < \sigma_1$, $\sigma_3 < \sigma_2$ etc., pînă se ajunge la o valoare σ_I pentru care epruveta nu se mai rupe cînd este solicitată la cele 10^7 cicluri de mărime σ_R . S-a găsit astfel



la oțel, ea este linia DB , pe cînd curba lui Wöhler este linia ABC . Se observă deosebirea esențială între cele două curbe: un punct de pe linia AB arată la ce valoare σ_{max} epruveta *se rupe* cînd este supusă unui număr de cicluri N ; un punct de pe linia DB arată ce valoare a suprasolicitării ($\sigma_{max} > \sigma_R$) poate suporta epruveta, pe durata N cicluri, așa ca rezistența la oboseală a ei să nu scadă, deci să poată suporta, ulterior, un număr oricît de mare de cicluri de amplitudine σ_R .

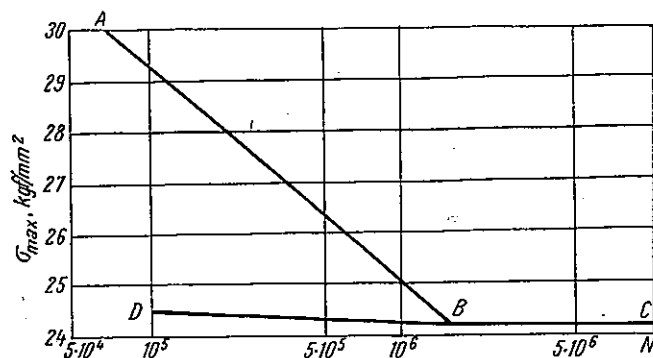


Fig. 4.67.

Traseul curbei suprasolicitărilor nepericuloase variază după material. Așa, spre exemplu, pentru un oțel carbon cu 0,25—0,40% C, avînd grăunți mari de austenită, se obține diagrama din fig. 4.67, care arată că materialul nu suportă decît suprasolicitări mici; pentru același oțel, cu grăunți fini de austenită, se obține diagrama din fig. 4.68, la care linia DB are pantă mai mare, avantajoasă. În fig. 4.69 se arată, pentru un același material, curbele de oboseală și curbele suprasolicitărilor nepericuloase, pentru trei stări: 1 — epruvetă netedă necălită; 2 — epruvetă cu concentrator; 3 — epruvetă călită. Liniile pline reprezintă curba lui Wöhler, iar cele punctate curba suprasolicitărilor nepericuloase; se observă că epruveta netedă suportă suprasolicitări foarte mici, în comparație cu celelalte.

Studiul suprasolicitărilor, examinat în această lucrare, constituie un caz particular de solicitare prin cicluri nestaționare. Problema va fi reluată, în caz mai general, la cap. 6.

d. Subsolicitări. Încărcarea unei epruvete, pe o anumită durată, cu cicluri inferioare rezistenței la oboseală și încercarea ei ulterioară la oboseală arată că se obține un efect de mărire a rezistenței la oboseală numit *efect de subsolicitare*.

Pentru o fontă cu $\sigma_r = 14 \text{ kgf/mm}^2$ și $\sigma_{-1} = 6,5 \text{ kgf/mm}^2$, supusă unei subsolicitări de $0,2 \text{ kgf/mm}^2$, timp de $1,5 \cdot 10^7$ cicluri, s-a obținut o sporire de 25% a rezistenței la oboseală. La un oțel car-

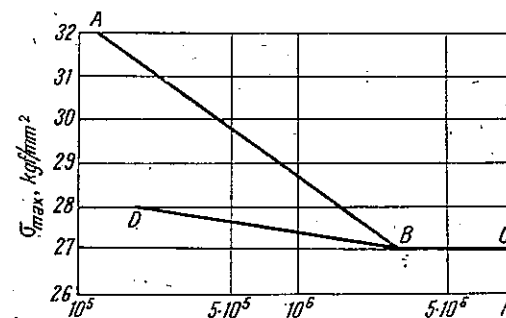


Fig. 4.68.

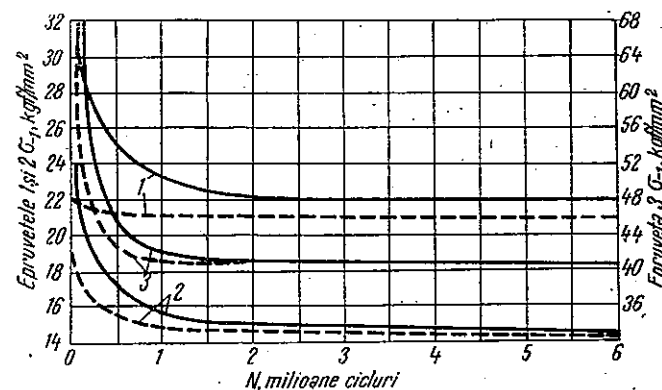


Fig. 4.69.

bon, cu 0,015% C, avînd $\sigma_r = 31 \text{ kgf/mm}^2$ și $\sigma_{-1} = 18,3 \text{ kgf/mm}^2$, supus unei subsolicitări de 14 kgf/mm^2 , se obține o creștere a rezistenței la oboseală de 6,1% la $0,5 \cdot 10^7$ cicluri, de 8% la $3 \cdot 10^7$ cicluri și de 23% la $6 \cdot 10^7$ cicluri. Se constată de asemenea că suprasolicitările, urmate de subsolicitări, de anumite mărimi și durate, măresc rezistența la oboseală.

S-a constatat, de asemenea, că pauzele, în încercarea la oboseală, au efect favorabil asupra rezistenței la oboseală; cu cît pauzele sînt mai mari, rezistența la oboseală crește.

4.10. PRIVIRE DE ANSAMBLU ASUPRA FACTORILOR DE CARE DEPINDE REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

Din examinarea materialului documentar prezentat în acest capitol, rezultă că pentru luarea în considerare a diferiților factori de care depinde rezistența la oboseală, se introduc în calcule trei coeficienți principali:

1. Coeficientul efectiv de concentrare, β_k .
2. Factorul dimensional, ε .
3. Coeficientul de calitate, γ .

În ce privește coeficientul de calitate, datele asupra lui vor fi completate la cap. 5. Se va vedea că el poate fi subunitar sau supraunitar, pe cînd β_k este totdeauna supraunitar iar ε subunitar. Cei trei coeficienți vor fi introduși în calculul la oboseală, cum se va arăta la cap. 6.

Trebuie subliniat că valorile coeficienților β_k , ε , γ , date în această lucrare sau în altele, au — ca și rezistența la oboseală — un caracter statistic. Piesele reale vor avea abateri, în plus sau în minus, în limitele calculului statistic, față de aceste valori. Mărima coeficienților de siguranță care se vor introduce la cap. 6 se alege așa fel ca abaterile statistice asupra rezistenței la oboseală să nu ducă la periclitarea piesei calculate.

Se vor evita aprecierile asupra coeficienților β_k , ε , γ , dacă se fac încercări la oboseală chiar asupra piesei reale, în care caz, singurul element care intră în calcul, reprezentînd proprietățile la oboseală ale materialului, este rezistența la oboseală a piesei.

Uneori se poate ca într-o secțiune să existe doi concentratori (de exemplu montaj presat și gaură transversală), pentru care în documentația existentă să găsim coeficienții de concentrare β_{k1} , β_{k2} . În asemenea cazuri, coeficientul de concentrare rezultat se ia ca produs al celor parțiali

$$\beta_k = \beta_{k1} \cdot \beta_{k2}$$

Analog, pentru coeficienții de calitate

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$$

Capitolul 5

METODE TEHNOLOGICE ȘI CONSTRUCTIVE DE MĂRIRE A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ

5.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Cunoașterea efectului pe care diferiții factori — în special starea suprafeței piesei și concentratorii — îl au asupra rezistenței la oboseală a dus nu numai la aprecierea lor cantitativă în calcule, ci mai ales la o serie de metode tehnologice menite a spori rezistența la oboseală. În ultimii 20—30 ani, alături de tehnologia de fabricație a pieselor, prin turnare, forjare, așchiere etc., s-a născut o tehnologie nouă — aceea a tratamentelor superficiale menite a îmbunătăți rezistența la oboseală.

Această tehnologie nouă a dus la metode bine precizate, dotate cu utilaje corespunzătoare și întîlnite astăzi pretutindeni, în fabricația modernă de mașini.

O clasificare a metodelor care duc la îmbunătățirea rezistenței la oboseală poate fi făcută [57] cum se arată în tabela 5.1: operațiile tehnologice de fabricație, tratamentele mecanice, termochimice și termice superficiale, acoperirile anticorozive etc. Operațiile tehnologice de fabricație sînt inerente și efectul lor a fost examinat, într-o oarecare măsură, la cap. 4. În cele ce urmează, se vor descrie tratamentele superficiale, care urmează prelucrării propriu-zise a pieselor.

S-a constatat, de asemenea, că anumite forme constructive ale pieselor sînt avantajoase, ele micșorînd în special efectul concentratorilor; cîteva din aceste forme constructive vor fi examinate la sfîrșitul capitolului.

Metodele de îmbunătățire a rezistenței la oboseală sînt atît de răspîndite în tehnologia modernă, încît numeroase studii și monografii se ocupă de ele. Se citează, printre altele, lucrările [16], [40], [59], traduse din limba rusă, sau lucrările [18], [28], [32], [34], [35], [36], [58], [65], [84].

Tabela 5.1

Metode tehnologice de îmbunătățire a rezistenței la oboseală

Operații tehnologice de fabricare a pieselor metalice	Prelucrările prin așchiere Forjarea și presarea Sabiarea Prelucrarea filetului prin rulare
Tratamente mecanice superficiale de întărire	Rularea cu role Improșcarea cu jet de alicie Ecrusarea cu poanson a găurilor și altor concentratori
Tratamente termochimice	Cementarea Cianurarea Nitrurarea Cementarea în gaz
Tratamente termice superficiale	Călire prin curenți de înaltă frecvență Călire superficială cu flacără Călire electrică prin contact
Acoperiri anticorozive	Cromarea Cromarea difuză Nichelarea Acoperirea cu aluminiu Zincarea

Ca regulă generală, efectul favorabil al unui tratament superficial se va exprima prin *coeficientul de calitate* γ , supraunitar, definit prin relația

$$\sigma_{-1p} = \gamma \cdot \sigma_{-1}, \quad (5.1)$$

în care:

- σ_{-1p} este rezistența la oboseală a piesei tratate;
- σ_{-1} — rezistența la oboseală a piesei fără tratament.

5.2. TRATAMENTE MECANICE SUPERFICIALE DE ÎNTĂRIRE

5.2.1. Privire generală

Tratamentele mecanice superficiale produc o ecrusare a suprafeței piesei, pe o adâncime de zecimi de milimetri, până la milimetri întregi, ca urmare a aplicării statice sau dinamice a unor

forțe normale pe suprafață. În urma acestei ecrusări se produc, așa cum s-a arătat anterior, tensiuni remanente de compresie, în stratul superficial ecrusat. În fig. 5.1 se arată, prin curba 1, diagrama tensiunilor remanente, de compresie în stratul superficial și de întindere în miezul piesei. Linia 2 arată distribuția eforturilor unitare de încovoiere în secțiunea barei, datorită sarcinilor aplicate. Prin compunerea diagramelor 1 și 2, rezultă curba 3, care arată micșorarea sensibilă a eforturilor unitare de întindere în fibrele extreme, simultan cu o creștere a celor de compresie. Cum eforturile unitare de întindere sînt cele care cauzează ruperea fragilă, se explică în acest fel creșterea rezistenței la oboseală datorită ecrusării superficiale.

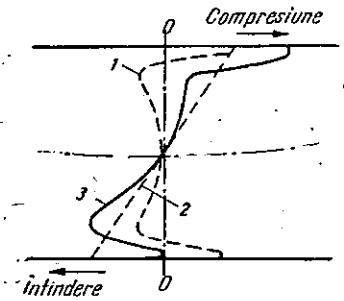


Fig. 5.1.

În al doilea rând, ecrusarea superficială produce o nivelare a microreliefului și o închidere parțială a microfisurilor, cu efect favorabil.

Tratamentele mecanice superficiale sînt astăzi folosite pe scară largă, în special la fusurile arborilor, la locurile de calare a roților pe arbori și mai ales la ameliorarea efectului concentratorilor de eforturi unitare.

5.2.2. Rularea cu role

În acest procedeu de întărire se apasă cu o rolă profilată, în mișcare, pe suprafața cilindrică sau plană a unei piese, uneori chiar pe suprafața concentratorilor.

Procedeu este recomandat în special acolo unde trebuie să se asigure suprafețe cât mai netede: fusuri de arbore, suprafețe de calare etc.

În fig. 5.2 se arată schema dispozitivului TNIITMAȘ pentru rularea epruvetelor cilindrice. Arcul tarat poate modifica, după dorință, forța de apăsare a roletelor pe piesă. Efectul favorabil al rularii se va exprima prin

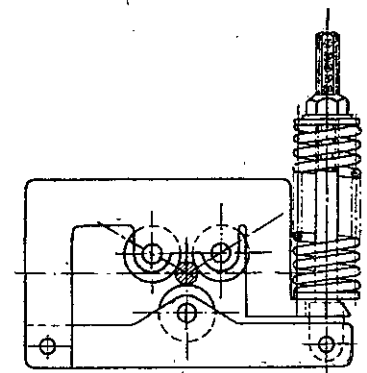


Fig. 5.2.

coeficientul de calitate γ , supraunitar, dat de relația (5.1). Se constată că γ crește sensibil cu forța de apăsare a rolei, respectiv cu adâncimea stratului ecruiat. În fig. 5.3 se arată cum crește

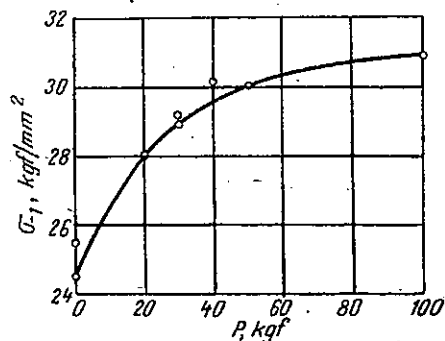


Fig. 5.3.

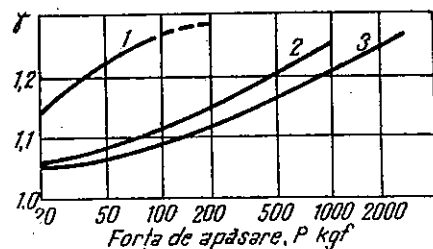


Fig. 5.4.

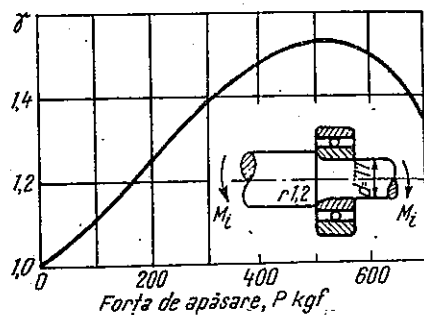


Fig. 5.5.

și un moment încovoiător; curba 3 — oțel carbon cu $\sigma_r = 52 \text{ kgf/mm}^2$, $d = 40 \text{ mm}$; efortul nu se transmite prin piesa presată.

tență la oboseală a epruvetelor din OLC 45, în funcție de forța de apăsare a rolei. În fig. 5.4 se dau coeficienții γ pentru arbori netezi, din oțel cu $\sigma_r = 62 \text{ kgf/mm}^2$, rulați: curba 1 — epruvetă cu $d = 18 \text{ mm}$; curba 2 — epruvetă cu $d = 25 \text{ mm}$; curba 3 — epruvetă cu $d = 50 \text{ mm}$. Solicitățile au fost de încovoiere. Se observă creșterea sensibilă a lui γ odată cu forța P .

În fig. 5.5 se dă variația lui γ cu P , pentru un arbore la care s-a rulat suprafața de așezare a rulmentului, făcut din oțel cu 0,36% C, 0,55% Mn, 0,32% Si, 0,19% Cr, având $\sigma_r = 60 \text{ kgf/mm}^2$, solicitarea fiind de încovoiere rotativă.

În fig. 5.6 se dă variația lui γ cu P , pentru arbori solicitați la încovoiere, la care s-a rulat suprafața de calare pe care se va fixa o piesă: curba 1 — OLC 45, $d = 18 \text{ mm}$, efortul nu se transmite prin piesa presată; curba 2 — OLC 45 și oțel cu nichel cu $\sigma_r = 77 \text{ kgf/mm}^2$, prin piesa presată se transmite o forță

În fig. 5.7 se arată coeficientul de calitate pentru o eclisă la care s-au rulat găurile, în funcție de creșterea procentuală a diametrului găurilor. S-au notat cu d_0 diametrul inițial al găurilor și cu d diametrul după rulare. Materialul este oțel cu $\sigma_r = 70 \text{ kgf/mm}^2$, iar solicitarea este de întindere-compresiune simetrică.

Pentru filete consolidate prin rulare, s-a obținut $\gamma = 1,65 \dots 1,7$; pentru arbori cotiți, cu fusuri rulate, $\gamma = 1,4 \dots 2,0$.

În fig. 5.8 se arată relația între coeficientul γ și grosimea relativă a stratului ecruiat $\frac{\Delta}{R}$ (Δ — grosimea stratului ecruiat, R — raza arborelui) pentru diferite tipuri de oțeluri: curba 1 — oțel 12 HN ZA, $d = 6,5 \text{ mm}$; curba 2 — oțel 12 HN ZA, $d = 35 \text{ mm}$; curba 3 — oțel 37 HN ZA, $d = 6,5 \text{ mm}$; curba 4 — oțel 37 HN ZA, $d = 35 \text{ mm}$; curba 5 — oțel 18 HN VA, $d = 6,5 \text{ mm}$ [75]. Notațiile oțelurilor corespund normelor GOST. Se observă că, pentru același material, efectul rulării variază foarte puțin cu diametrul epruvetei.

Efecte deosebit de favorabile se obțin prin rularea pieselor din fontă cu grafit nodular [34]. Astfel, în fig. 5.9 se arată, comparativ, curbele lui Wöhler în următoarele alternative: a — epruvete netede; b — epruvete crestate; 1 — epruvete netratate; 2 — epruvete ecruiate prin rulare. Se observă că în timp ce la epruvetele netede sporul de rezistență este de 20% ($\gamma = 1,2$), la cele crestate

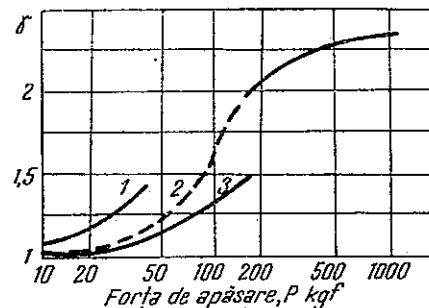


Fig. 5.6.

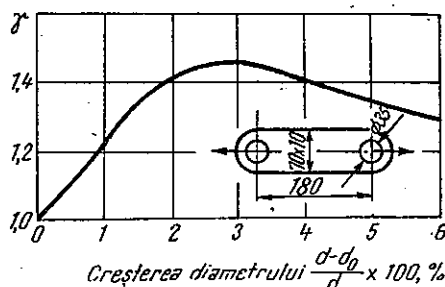


Fig. 5.7.

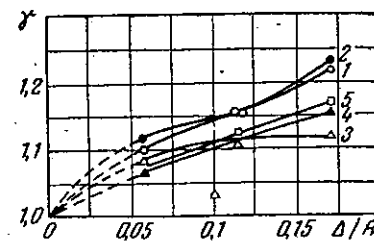


Fig. 5.8.

este de 80% ($\gamma=1,8$). La arbori cotiți din fontă cu grafit nodular, la care s-au rulat porțiunile de racordare între fusuri, manetoane și manivele, s-a obținut $\gamma=1,65 \dots 1,95$, pe când la aceleași piese, din OLC 45, a rezultat $\gamma=1,45$. Acest lucru justifică, printre altele, și avantajul de a înlocui, la unele mașini, arborii din oțel prin arbori din fontă cu grafit nodular [40].

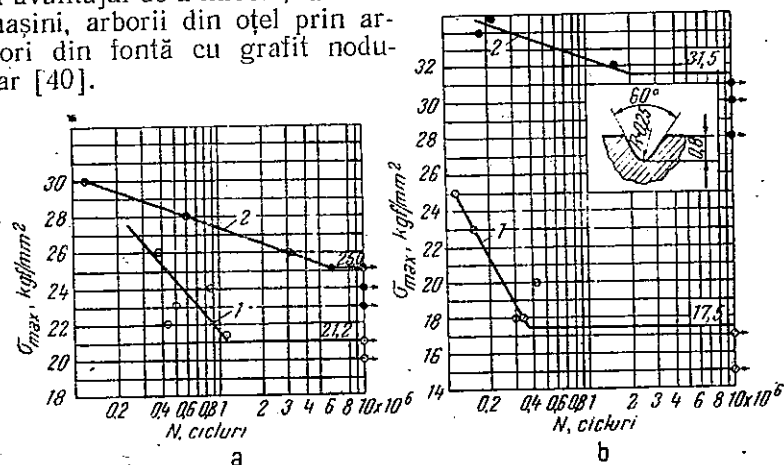


Fig. 5.9.

În fig. 5.10 se dau coeficienții γ , funcție de grosimea relativă Δ/R a stratului ecruișat, pentru aliajul de aluminiu AK-4-1 (după GOST): curba 1 — arbore neted, $d=18$ mm, întindere-compre-

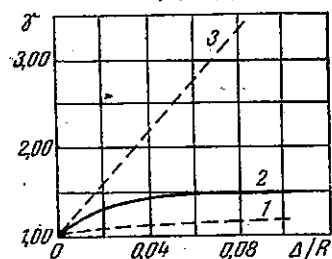


Fig. 5.10.

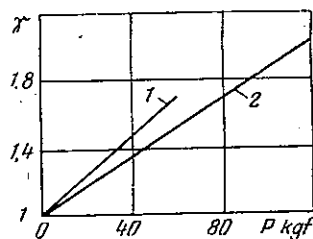


Fig. 5.11.

siune; curba 2 — arbore neted, $d=35$ mm, încovoiere; curba 3 — epruvetă cu concentrator ($\alpha_k=2,91$), $d=35$ mm, încovoiere [75].

Fig. 5.11 dă valorile lui γ , funcție de P , pentru un aliaj de magneziu cu $\sigma_{-1}=70$ kgf/mm². Piesa încercată a fost o tijă, trans-

mitând forță axială și moment încovoiator. Curba 1 — fără șanț de pană; curba 2 — cu șanț longitudinal, adânc de 8 mm [75].

Studiile efectuate pînă acum asupra rulării au dus la următoarele concluzii generale:

- la piese netede, ea mărește rezistența la oboseală cu 20—40%;
- la piese cu concentratori, atunci când poate fi aplicată, sporește rezistența la oboseală cu 60—80%;
- comparativ, dă rezultate superioare ecruișării prin jet de alicie;
- rezultatele favorabile se mențin și la piesele încercate la oboseală la cald, sau în mediu corosiv.

Date interesante asupra tratamentului prin rulare se găsesc în lucrările [28], [34], [40], [41], [59], [63].

5.2.3. Ecruișarea prin apăsare cu poanson

Un tratament similar rulării se aplică pentru ecruișarea materialului din jurul concentratorilor, în special al găurilor. Ecruișarea se poate face cu poanson conic (fig. 5.12) sau cu poanson plat (fig. 5.13), după forma găurii. În fig. 5.13 se dau valorile

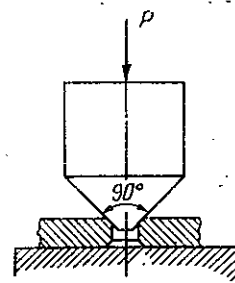


Fig. 5.12.

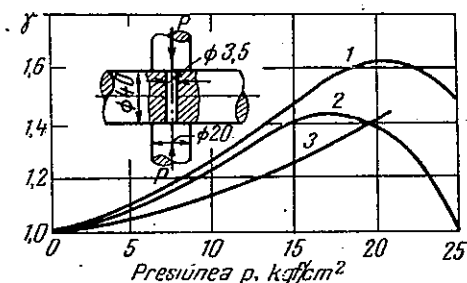


Fig. 5.13.

lui γ , funcție de presiunea cu care poansonul apasă pe piesă: curba 1 — oțel cu $\sigma_r=55$ kgf/mm², încovoiere; curba 2 — oțel cu $\sigma_r=40$ kgf/mm², încovoiere; curba 3 — oțel cu $\sigma_r=40$ kgf/mm², răsucire.

5.2.4. Improșcarea cu jet de alicie

Ecruișarea cu jet de alicie este, de asemenea, un tratament modern de mărire a rezistenței la oboseală. Metoda constă în a arunca, cu viteză, alicie de duritate mare — de obicei din fontă — pe suprafața prelucrată a piesei.

În fig. 5.14 se arată schema instalației ЭНИПП (ENIPP) [41] pentru ecrusare cu alice, prin gravitație. Elementele componente sînt elevatorul cu cupe 1, buncărul 2, clapeta de reglare a debitului de alice 3, piesa care se tratează 4 și motorul elevatorului 5. Aici viteza de aplicare a alicelor rezultă din căderea liberă.

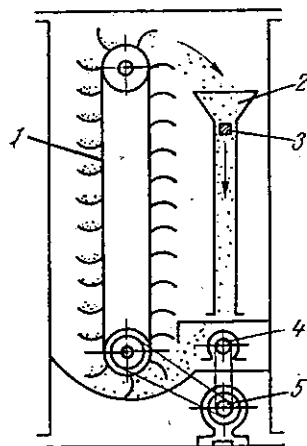


Fig. 5.14.

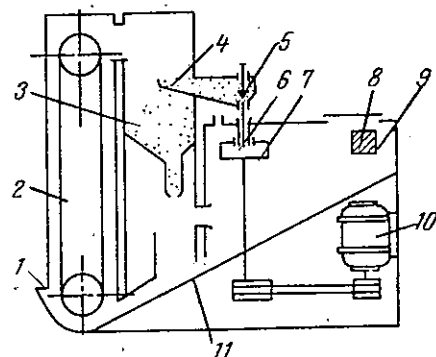


Fig. 5.15.

Instalația de ecrusare ЛНИИТМАШ (ЛНИТМАШ) [41], arătată în schema din fig. 5.15, se compune din buncărul 1, elevatorul 2, buncărul-separator 3, buncărul-alimentator 4, ventilul reglator 5, tubul vertical 6, rotorul 7 acționat de motorul 10, piesa de tratat 8 și camera de lucru 9. Alicele sînt împroșcate asupra piesei prin efectul forței de inerție a rotorului.

Ecrusarea cu jet de alice este indicată la piese cu suprafețe complicate, piese cu concentratori, unde rularea nu poate fi aplicată. Efectul ecrusării cu alice este independent de gradul de prelucrare anterioară prin așchiere a piesei. Ca urmare, în calcule, la piesele tratate cu alice nu se va mai lua în considerație coeficientul de calitate al prelucrării suprafeței. Această afirmație nu este însă valabilă pentru piese cu suprafețe neprelucrate (turnate, forjate, laminate). La piese cu suprafața foarte bine lustruită, efectul ecrusării cu alice este redus; din contră, la piesele cu zgîrieturi ușoare, efectul este remarcabil. Pentru concentratorii mari de eforturi unitare, ecrusarea cu alice trebuie să fie puternică, spre a pătrunde pînă la 1—2 mm. Efectul pozitiv al ecrusării cu alice dispare complet printr-o încălzire la 200—250 °C.

Efectul ecrusării este funcție de cantitatea de alice consumate: în fig. 5.16 se arată cum crește rezistența la oboseală a unui oțel 45 HN (după GOST), epruvetă cu diametru de 12 mm, odată cu consumul de alice. Se vede că peste o anumită cantitate, efectul ecrusării începe să scadă.

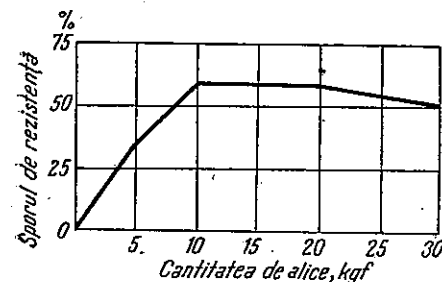


Fig. 5.16.

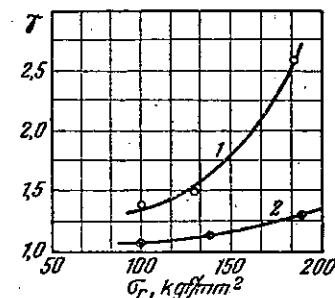


Fig. 5.17.

Încercări efectuate cu o serie de piese de automobile și avioane au arătat că, în urma ecrusării cu jet de alice, durata în serviciu a pieselor crește enorm, cum arată datele din tabela 5.2.

Pentru epruvete netede, din diferite materiale, coeficienții de calitate γ ai tratamentului cu jet de alice sînt arătați în tabela 5.3. Se vede că ei se mențin, în medie, în jurul valorii $\gamma=1,2$.

În fig. 5.17 se dau coeficienții γ , funcție de rezistența de rupere statică a materialului ecrusat prin alice [75]: curba 1 — oțel cu 0,45% C și 1% Mn; curba 2 — oțeluri 30 HGSA și 18 HN VA.

Tabela 5.2

Creșterea duratei în serviciu a unor piese ecrusate prin jet de alice

Denumirea piesei	Creșterea duratei %
Arcuri elicoidale	2 900
Arcuri de foi	600
Arbori cotiți de automobile	900
Arbori cotiți de avioane	2 900
Arbori de la cutia de viteze	520
Roți dințate la cutia de viteze	560
Roți dințate la diferențial	600
Came	475
Imbinări sudate	310

Tabela 5.3

Efectul ecruisării cu alică asupra rezistenței la oboseală a unor epruvete netede [63]

Materialul	Tratamentul termic	Solicitarea	Starea suprafeței realizată prin	σ_r kgf/mm ²	σ_{-1} (netratat) kgf/mm ²	Efectul tratamentului γ
Fier Armco		Incovoiere pulsatorie	Lustruire	—	18,75	1,01
Oțel 30 HGSA	Revenire la temperatură joasă	Incovoiere simetrică	Lustruire	180	61	1,31
Idem	Idem	Idem	Strunjire de finisare	180	53	1,51
Idem	Revenire la temperatură înaltă	Idem	Lustruire	99	50,5	1,06
Idem	Idem	Idem	Strunjire de finisare	99	37,5	1,40
Oțel 60 S2	Revenire la 480 °C	Idem	Rectificare	151	54,5	1,24
Oțel crom-nichel		Răsucire pulsatorie	Nelustruire	—	32,2	2,00
Aliaj de aluminiu AK4-1	—	Incovoiere simetrică	Lustruire	—	13,5	1,29
Aliaj de aluminiu VD17	—	Idem	Idem	—	16	1,22
Aliaj de magneziu AZ-31	—	Incovoiere pulsatorie	Strunjire fină	29	9,2	1,26

Tabela 5.4

Efectul ecruisării superficiale asupra rezistenței la oboseală a unor epruvete cu concentratori [63]

Materialul	Tratamentul termic	Forma epruvetei	α_k	Rezistența la oboseală în stare netratată σ_{-1} kgf/mm ²	Creșterea rezistenței la oboseală γ	β_k		η	
						Netratat	Tratat	Netratat	Tratat
Oțel 30 HGSA	Revenire la 200 °C	Netedă $d=8$ mm	—	61	1,31	—	—	—	—
Idem	Idem	Crestată $d=8$ mm $t=r=1,1$ mm	1,9	34,5	1,77	1,75	1,31	0,83	0,34
Oțel 40H	Normălizare	Netedă	—	30,2	1,16 *)	—	—	—	—
Idem	Idem	Crestată $d=18$ mm $t=0,4$ mm; $r=0,3$ mm	3,0	17,7	1,73 *)	1,71	1,09	0,36	0,04
Oțel 60S2	Revenire la 480 °C	Netedă	—	54,4	1,24	—	—	—	—
Idem	Idem	Crestată $d=11$ mm $t=r=0,5$ mm	2,3	28,3	1,78	1,92	1,34	0,71	0,26
Aliaj de aluminiu AK-1	—	Netedă	—	13,5	1,28	—	—	—	—
Idem	—	Crestată $d=12$ mm $t=r=0,75$ mm	2,2	8	2,12	1,68	1,03	0,62	0,03
Aliaj de aluminiu VD17	—	Netedă	—	16	1,22	—	—	—	—
Idem	—	Crestată $d=10$ mm $t=r=0,75$ mm	2,0	10	1,75	1,60	1,18	0,60	0,18

*) Ecruisarea s-a făcut prin rulare.

Efecte incomparabil superioare are ecruisarea cu alice asupra pieselor cu concentratori. Așa cum se arată în tabela 5.4, ecruisarea cu alice mărește rezistența la oboseală, pentru materialele cercetate, cu 16—31% când sînt netede, respectiv cu 73—120% când au concentratori. Dacă se examinează valorile lui β_k , sau ale coeficientului de sensibilitate η , se constată că uneori ecruisarea cu alice anulează practic efectul concentratorului, atît la

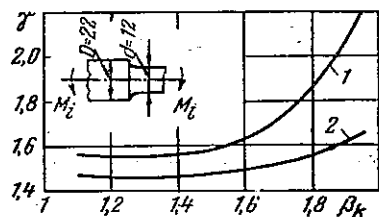


Fig. 5.18.

oțel, cît și la aliaj de aluminiu. Constatări absolut analoge se obțin din fig. 5.18, unde s-a redat variația lui η , funcție de β_k , pentru oțel 45 HN, cu $\sigma_r = 155 \text{ kgf/mm}^2$, solicitat la încovoiere rotativă: curba 1 — debitul alicelor 10 kgf/min, turația rotorului mașinii 3 500 rot/min; curba 2 — 20 kgf/min și 2 100 rot/min [75].

La piese din fontă cu grafit nodular fără concentratori s-a obținut $\eta = 1,13$, iar cu creștătură periferică, $\eta = 1,51$.

Din cele arătate rezultă avantajul considerabil al ecruisării cu alice la piesele cu concentratori de eforturi unitare executate din aliaje de mare rezistență.

5.3. TRATAMENTE TERMOCHIMICE

Tratamentele termochimice constau în modificarea compoziției chimice a stratului superficial al pieselor, executată la temperatură înaltă. Ele au ca urmare modificări ale proprietăților mecanice ale stratului superficial, respectiv îmbunătățirea rezistenței la oboseală. Și în acest caz, efectul favorabil al tratamentului se măsoară prin coeficientul de calitate γ , supraunitar, definit prin formula (5.1).

a. **Cementarea** constă în mărirea procentului de carbon al stratului superficial al pieselor din oțel cu conținut mic de carbon, prin încălzirea la 850—950 °C, timp de 3—5 ore, într-o baie cu praf de cărbune și carbonat de bariu. Prin acest tratament, conținutul de carbon al stratului superficial crește, pînă la cel mult 1,20% C, pe o grosime ce variază între 0,5 și 2 mm. Ca urmare, duritatea stratului superficial se mărește, iar rezistența la oboseală a piesei, după ce a fost călită, sporește apreciabil.

Cementarea se aplică curent la roți dințate, bolțuri de piston și alte piese de automobile și tractoare.

Cementarea se poate executa și în gaze conținînd carbon.

În fig. 5.19 se arată variația rezistenței la oboseală a unui oțel, în funcție de grosimea stratului cementat: curba 1 se referă la materialul răcit rapid, după cementare, iar curba 2 la cel răcit lent. Se observă că peste o anumită grosime, cementarea devine nefavorabilă.

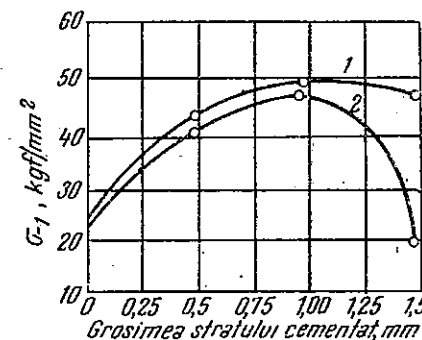


Fig. 5.19.

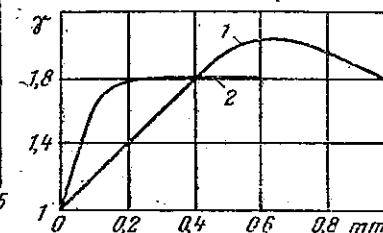


Fig. 5.20.

b. **Cianurarea** este un tratament termochimic, prin care se mărește conținutul de carbon și azot al stratului superficial, prin difuziunea acestor elemente, pe o grosime ce poate merge pînă la 2,0—2,5 mm. Cianurarea se poate executa fie în băi lichide, cu cianură de sodiu, fie în atmosferă gazoasă, cu amoniac. Tratamentul se aplică oțelurilor cu conținut redus sau mijlociu de carbon, ca și oțelurilor de scule.

În fig. 5.20 se arată relația între grosimea stratului cementat sau cianurat și coeficientul de calitate al tratamentului: curba 1 — oțel cementat; curba 2 — oțel cianurat. Se vede și de aici că depășirea unei anumite grosimi a stratului cementat poate fi dezavantajoasă.

c. **Nitrurarea** constă în încălzirea pieselor, timp de 0,5—14 zile, la 500 °C, într-o atmosferă cu amoniac; ca urmare, azotul difuzează în metal, pe o grosime de 0,1 la 0,2 mm. Nitrurarea de lungă durată are rolul de a mări duritatea pieselor, pe cînd cea de scurtă durată are efect anticorrosiv. Prin nitrurarea de lungă durată, aplicată în special oțelurilor cu crom, aluminu, nichel, molibden, se mărește sensibil rezistența la oboseală, mai

ales la piesele avînd concentratori de eforturi unitare, Nitrurarea se aplică curent arborilor motoarelor de autovehicule. Nitrurarea de scurtă durată produce un strat anticorrosiv de 10—100 μ , în timp de 10 min pînă la 3 h. Această nitrurare are efect favorabil și asupra rezistenței la oboseală, sporind-o cu 50—60% la oțel carbon și 14—27% la oțeluri aliate (cifrele mari se referă la piese cu concentratori). Nitrurarea de scurtă durată reduce sensibil reziliența, fără a modifica proprietățile mecanice la solicitări statice.

În fig. 5.21 se arată coeficientul de calitate γ , funcție de grosimea relativă t/d a stratului nitrurat (t — grosimea stratului nitrurat; d — diametrul piesei). Curba 1 se referă la piese de grosime 2,5 mm avînd concentrator, iar curba 2 la piese netede, cu diametrul de 6,5 mm [24]. În fig. 5.22 se arată relația între coeficientul de calitate γ și coeficientul de concentrare β_k , pentru solicitarea la încovoiere: curba 1 — grosimea stratului nitrurat 0,35 mm, $d=12,7$ mm, oțel cu 0,31% C, 3,25% Cr, 0,55% Mo, avînd $\sigma_r=100$ kgf/mm²; curba 2 — grosimea stratului nitrurat 0,40—0,45 mm, $d=40$ mm, oțel EI 275, avînd $\sigma_r=120$ kgf/mm² [75].

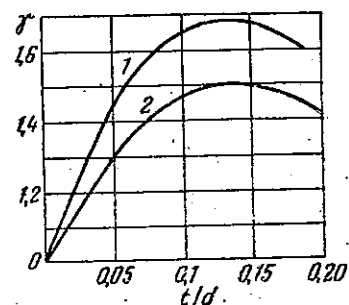


Fig. 5.21.

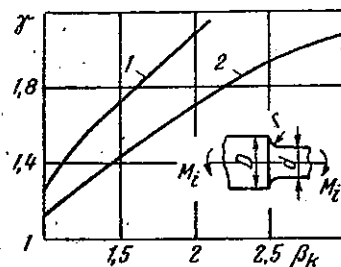


Fig. 5.22.

Din cele arătate, rezultă că cementarea și cianurarea se aplică în special oțelurilor cu conținut redus sau mediu de carbon, pe cînd nitrurarea este recomandabilă pentru oțeluri aliate de mare rezistență.

În tabela 5.5 se dă comparația între efectele celor trei feluri de tratamente termochimice asupra epruvetelor și pieselor cu și fără concentratori. Se vede că nitrurarea este utilă în special la piesele cu concentratori, pe cînd cementarea și cianurarea îmbunătățesc atât piesele netede, cît și pe cele cu concentratori.

Tabela 5.5

Comparație între efectul diferitelor tratamente termochimice asupra rezistenței la oboseală [75]

Tratamentul termochimic	Felul epruvetei	Diametrul epruvetei d mm	γ
Nitrurare, cu grosimea de 0,1—0,4 mm; duritatea stratului nitrurat HV=730—970	Netedă	8—15 30—40	1,15—1,25 1,10—1,15
	Cu concentrator	8—15 30—40	1,9—3 1,3—2
Cementare, cu grosimea stratului de 0,2—0,6 mm	Netedă	8—15 30—40	1,2—2,1 1,1—1,5
	Cu concentrator	8—15 30—40	1,5—2,5 1,2—2
Cianurare, cu grosimea stratului de 0,2 mm	Netedă	10	1,8

5.4. TRATAMENTE TERMICE SUPERFICIALE

Tratamentele termice superficiale sînt: călirea prin curenți de înaltă frecvență și călirea superficială cu flacără.

La călirea prin curenți de înaltă frecvență, piesa ce va fi tratată se așază în interiorul sau dedesubtul inductorului instalației de călire. În stratul superficial al piesei se induc curenți Foucault, care produc o încălzire puternică, inferioară însă punctului critic. Durata încălzirii este de cîteva zeci de secunde, după care urmează răcirea bruscă. Adîncimea pe care se realizează călirea variază invers proporțional cu frecvența curentului; pentru adîncimi mici se folosesc frecvențe foarte înalte (50 000—100 000 Hz), iar pentru adîncimi mai mari, frecvențe mijlocii (10 000 Hz). Călirea prin curenți de înaltă frecvență se aplică în special la fabricația de serie, inductorul fiind construit după forma pieselor.

Călirea cu flacără se realizează prin încălzirea rapidă — cu bec de gaz metan sau acetilenă — a suprafeței piesei, urmată de răcirea în curent puternic de apă. Instalațiile moderne sînt automatizate, producînd rotirea continuă a piesei și deplasarea longitudinală a flăcării. Călirea cu flacără, mai puțin răspîdită, se aplică pieselor mari: batiuri, arbori cotiți, axe etc.

Tratamentele de călire superficială se aplică oțelurilor cu conținut de 0,3—0,6% C, oțelurilor de scule și fontelor.

Tratamentele de călire superficială cer o tehnologie îngrijită, căci în caz contrar pot apare fisuri, cu efect defavorabil. Ruperea prin oboseală, la astfel de piese, apare în locuri de trecere de la suprafața călită la cea necălită.

Călirea superficială este însoțită adeseori de prelucrări sau tratamente mecanice ulterioare — rectificare, ecruisare cu alicie — ceea ce face să se cumuleze efectele favorabile.

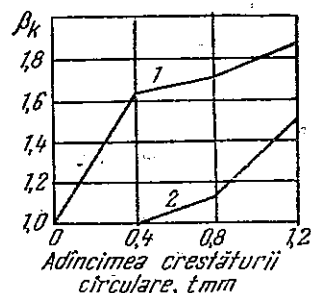


Fig. 5.23.

Prin călire superficială, stratul de la suprafață al pieselor își sporește considerabil duritatea (de 2—3 ori).

Călirea superficială are efect favorabil asupra rezistenței la oboseală a pieselor. Creșterea rezistenței la oboseală se măsoară prin coeficientul de calitate γ al tratamentului.

La piese netede din oțel, se obține $\gamma = 1,25 \dots 1,50$, iar la cele din fontă — cu sau fără concentratori — $\gamma = 1,20 \dots 1,40$.

Rezultate deosebit de bune se obțin prin călire superficială a pieselor din oțel cu concentratori. Așa, spre exemplu, în fig. 5.23 se arată valorile lui β_k , funcție de adâncimea creștăturii periferice circulare, în două alternative: 1 — epruvete netratate; 2 — epruvete călite superficial, pe adâncimea de 1,2 mm.

Tabela 5.6

Efectul călirii superficiale asupra epruvetelor de oțel cu concentratori

Felul epruvetelor cu $d=18$ mm	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²		γ	Observații
	Normalizat	Călit		
Netedă	24,5	42,5	1,73	Creștătura executată după călire
Cu creștătură, adâncă de 0,4 mm	14,8	42,2	2,82	
Idem, cu 0,8 mm	14,3	37,5	2,62	
Idem, cu 0,8 mm	14,3	38,2	2,69	
Idem, cu 1,2 mm	13,3	28,5	2,14	Creștătura executată după călire
Idem, cu 1,2 mm	13,3	30,2	2,27	
Cu gaură transversală, cu diametru de 3,6 mm	14,5	24,5	1,69	
Cu bucsă solicitată	14,2	36,5	2,59	

În tabela 5.6 se arată sporurile considerabile de rezistență, obținute pe epruvete cu concentratori, din oțel aliat, tratate prin curenți de înaltă frecvență. Se vede că atunci când concentratorii au fost tăiați după călire superficială, rezultatele obținute au fost și mai bune [41].

5.5. ACOPERIRI ANTICOROSIVE

Acoperirile metalice ale pieselor de mașini au diferite scopuri: protecția anticorosivă, mărirea rezistenței la uzură, micșorarea frecărilor, sau refacerea dimensiunilor inițiale ale pieselor uzate. În afara acoperirilor metalice, efectul anticorosiv se poate obține și prin alte acoperiri: lacuri, brunare, ungere etc.

Există diferite procedee tehnologice pentru aplicarea acoperirilor metalice: galvanizare, băi calde, metalizare, difuziune.

S-a constatat că acoperirile metalice produc, asupra pieselor încercate în aer, scăderi sensibile ale rezistențelor la oboseală, mergând pînă la 50%. Acest lucru pledează împotriva acoperirilor metalice făcute fără un scop bine determinat (de exemplu numai pentru motive estetice). Dintre procedeele de acoperiri metalice, cele mai mari scăderi ale rezistenței la oboseală le produce galvanizarea (acoperirea prin depunere electrochimică). Efectul defavorabil crește cu durata operației de galvanizare și cu adâncimea stratului depus. Fenomenul se explică prin difuziunea hidrogenului, în timpul galvanizării, în masa metalului. Această difuziune dă naștere unor tensiuni interne de întindere în stratul superficial al piesei, avînd tendința de dislocare a rețelei atomice și producînd micșorarea rezistenței la oboseală. Efectul defavorabil al acestei difuziuni poate fi redus — în parte sau chiar total, cu excepția pieselor cromate dur — prin încălzirea piesei la 160—200 °C, timp de 2—2,5 ore. Efectul defavorabil al acoperirilor galvanice poate fi compensat, printr-un tratament anterior cu efect contrar: ecruisare superficială, nitrurare. Efectul defavorabil al acoperirilor galvanice se manifestă mai accentuat la piesele netede, decît la cele cu concentratori.

În prezența mediului corosiv, piesa cu acoperiri metalice are rezistențe la oboseală mult sporite, față de piesa netratată, lucrînd în același mediu.

Ca acoperiri metalice anticorosive, se citează: cròmarea, nichelarea, arămirea, zincarea, oxidarea, cadmierea, aluminizarea, cositorirea, plumbuirea.

5.5.1. Cromarea

Există două feluri de cromări: cromarea dură, în scopul măririi rezistenței la uzură și cromarea anticorozivă și decorativă. Cromarea dură se aplică pieselor puternic solicitate la frecare, cum ar fi la automobile: axele cutiei de viteze, crucea cardanică, sateliții diferențialului, culbutorul supapei, arborele cu came, cilindrul motorului, arborele cotit (parțial) etc. Prin acest procedeu se aplică piesei, pe cale electrolitică, un strat de crom de 0,15—0,20 mm grosime. Stratul de crom are o duritate foarte mare. Cromarea dură micșorează rezistența la oboseală a piesei, uneori chiar pînă la 35%. Gradul de deteriorare este funcție de intensitatea curentului și temperatura care se produce la electroliză, de grosimea stratului de crom, compoziția chimică a oțelului și duritatea piesei. Detalii în această problemă se dau în lucrarea [44].

S-a constatat de asemenea că aplicarea unui strat de cupru, prin electroliză, anterior cromării, micșorează în parte efectul defavorabil al cromării; rezultate similare se obțin prin nitrurarea anterioară cromării.

În tabela 5.7 se arată efectul pe care îl are cromarea dură asupra rezistenței la oboseală a unor piese sau epruvete încercate în aer. Se observă scăderi de 20—30% ale rezistenței la piese din oțel. Scăderi mai mici, sau chiar efect nul, se obțin la piese din aliaje ușoare.

Cromarea anticorozivă și decorativă, cu un strat de crom de 1—2 μ , aplicat peste un strat de cupru sau de cupru-nichel, are efect mult mai mic asupra rezistenței la oboseală.

5.5.2. Nichelarea*

Nichelarea se aplică în scop anticoroziv. În grosimi pînă la 30 μ , duce la scăderi ale rezistenței la oboseală care ajung la 35% la piese netede; la piese cu concentratori, efectul defavorabil al nichelării este mult mai redus.

Și efectul rău al nichelării poate fi parțial combătut prin tratamente anterioare, prin straturi de cupru, sau prin încălzire după galvanizare.

5.5.3. Alte acoperiri metalice (galvanizări)

a. Arămirea, în straturi pînă la 30 μ , în scopul cromării sau nichelării ulterioare, micșorează rezistența la oboseală pînă la 15%. Tensiunile remanente produse prin galvanizări pot fi ușor

Tabela 5.7

Înfluența cromării asupra rezistenței la oboseală

Materialul piesei		Condițiile experimentării			Grosimea stratului de crom de crom mm	γ
Denumirea	Compoziția chimică	σ_r kg/mm ²	Felul epruvetei	Dimensiunile epruvetei		
Oțel	0,38% C; 0,2% Si; 0,54% Mn; 0,07% Cr; 0,24% Ni	60	Netedă	$d=18$ mm	0,03 0,10 0,10*	0,83 0,80 0,78
			Cu creștătură	—	0,03	0,93
Oțel	0,46% C; 0,35% Si; 0,68% Mn; 1,6% Cr	86	Netedă	$d=8$ mm	0,03 0,15 0,15*	0,72 0,85 0,66
Oțel	0,28% C; 0,35% Si; 0,71% Mn; 2,49% Cr 0,5% Ni; 0,21% Mo 0,20% V	103	Netedă	$d=8$ mm	0,04 0,04* 0,20	0,85—0,92 0,85 0,64
Oțel	0,41% C	71	Netedă	$d=8$ mm	0,035 0,035* 0,175 0,175*	0,89 0,85 0,85 0,69
Oțel	0,3% C; 3—3,75% Ni; 0,5—1,3% Cr; 0,5% Mo	108	Arbore cotit	$d=50$ mm	0,2	0,59
Aliaj foriați de magnezin	6—7% Al 0,1% Zn	$\sigma_r=27$ $\sigma_c=15$	Netedă	$d=8$ mm	—	0,72
			Netedă	$d=8$ mm	—	1,0
			Cu creștătură	$d=8$ mm	—	0,75
Aliaj de magnezin pentru turnat	9% Al 0,5% Zn	$\sigma_r=13$ $\sigma_c=9$	Cu gaură transversală	$D=8$ mm $d/D=0,188$	—	0,8
			Netedă	$d=8$ mm	—	0,615
			Netedă	$d=8$ mm	—	1
Aliaj de magnezin pentru turnat	9% Al 0,5% Zn	$\sigma_r=13$ $\sigma_c=9$	Cu gaură transversală	$D=8$ mm $d/D=0,188$	—	1
			Netedă	$d=8$ mm	—	1

*) După cromare s-a făcut o revenire la 250 °C, timp de două ore.

puse în evidență prin acoperirea metalică a unei plăci subțiri pe o singură parte: în urma galvanizării, placa se curbează.

b. Zincarea poate fi aplicată pe cale electrolitică, prin băi calde sau prin difuziune (șerdizare). Experiențele arată că piesele zincate prin galvanizare practic nu își micșorează rezistența la oboseală — au $\gamma \approx 1$ — iar cele zincate în băi calde suferă numai ușoare micșorări ale rezistenței.

Rezultate similare zincării se obțin prin oxidarea suprafeței pieselor.

c. Cadmierea este similară zincării, producând ușoare micșorări ale rezistenței la oboseală ($\gamma = 0,90 \dots 0,95$).

d. Cositorirea, plumbuirea. Cositorirea, prealabilă nichelării, mărește rezistența la oboseală. Acoperirea galvanică cu plumb micșorează numai puțin (3%) rezistența la oboseală.

5.5.4. Metalizarea

În ultima vreme a luat o dezvoltare destul de mare tehnica acoperirii prin metalizare: împrășcarea de particule metalice incandescente, cu un aparat suflător (pistol de metalizare), pe suprafața piesei. Metalizarea pieselor din oțel se poate face, tot cu oțel, în scopul anulării uzurii și readucerii la dimensiunile inițiale. Studii interesante în acest domeniu, aplicate în industrie, s-au făcut, în ultimii ani, de un colectiv de cercetători ai Institutului de mecanică aplicată al Academiei R.P.R.

Metalizarea cu zinc, aluminiu, cadmiu se face în scop anticorrosiv. Experiențele făcute asupra pieselor de oțel metalizate cu aluminiu au arătat variații ușoare — până la 10% — în plus sau în minus, față de rezistența la oboseală a pieselor netratate.

5.5.5. Rezultate comparative, referitoare la efectul acoperirilor metalice

O comparație între efectul diferitelor acoperiri metalice, la piese încercate la oboseală în aer, este dată în tabela 5.8. Datele se referă la epruvete încercate la încovoiere rotativă, având diametre de 8—18 mm.

Încercări efectuate pe un oțel carbon de calitate au arătat că în urma cromării se obține $\gamma = 0,78 \dots 0,83$ față de starea normalizată, în urma nitrurării urmată de cromare $\gamma = 1,49$, iar în urma rulării urmată de cromare $\gamma = 1,18$.

Tabela 5.8

Efectul comparativ al diferitelor acoperiri metalice asupra rezistenței la oboseală [75]

Materialul piesei	σ_r kgf/mm ²	Acoperirea metalică		Grosimea stratului mm	γ
		Procedeu	Material		
Oțel carbon și oțel slab aliat	60—100	Galvanizare	Ni Cr	0,03—0,1 0,03—0,2	0,65—1 0,65—0,90
Aliaje de magneziu, pentru forjat sau turnat	12—28	Galvanizare	Cr	—	0,6—0,75
Oțeluri cu conținut mijlociu de carbon	—	Oxidare	—	—	1
		Metalizare	Al	0,051	1
		Difuziune	Zn	0,013	0,9

5.5.6. Efectul acoperirilor metalice și al altor tratamente la piese lucrând în mediu corosiv

Pentru piese lucrând în mediu corosiv, efectul tratamentelor trebuie luat în considerare la funcționarea piesei în acel mediu. În urma experimentărilor se găsește un coeficient de calitate γ — care va fi introdus în calcul, reprezentând efectul concomitent al agentului corosiv și al tratamentului anticorrosiv. Pentru acoperirile metalice anticorrosive, coeficientul γ este subunitar, cum rezultă din tabelele 5.9 și 5.10. Acest coeficient este net superior celui obținut la piese netratate, lucrând în mediu corosiv (a se vedea cap. 4). Alte tratamente anticorrosive — rularea, nitrurarea — dau efecte mai avantajoase decât acoperirile metalice, putând anula complet efectul corosiv, adică dând $\gamma \geq 1$ (tabela 5.10).

Acoperiri anticorrosive, în condiții mai puțin dificile de lucru, se pot obține și prin lacuri, brunare, ungere cu ulei etc.

Tabela 5.9
Efectul agenților corosivi asupra rezistenței la oboseală a pieselor cu acoperiri metalice [68]

Materialul piesei			Epruveta		Stratul de acoperire		Încercarea la oboseală		γ
Denumirea	Tratamentul	Compoziția chimică	σ_r kgf/mm ²	Forma	d mm	Materialul	Grosimea mm	Agentul corosiv	
Oțel	Normalizat	0,36% C; 0,28% Si; 0,73% Mn	—	Netedă	10	Zn	0,030	Apă dulce	10 ⁷
Oțel	Călit și re-venit	0,37% C; 0,74% Mn; 0,61% Cr; 0,21% Si; 1,4% Ni	87	Netedă	9	Zn	0,004	Apă dulce	0,41
						Cd	0,0025		0,25
						Cd	0,0125		0,45
						Pb	0,0125		0,33
Oțel	Trefilată la rece	OLC60	100	Netedă	7	Zn	0,014	Soluție NaCl 3%	0,87
						Cd	0,013		0,77
Oțel	Normalizat	OLC60	65	Netedă	7	Zn	0,014	Soluție NaCl 3%	0,90
						Cd	0,013		0,84
Duraluminu	—	4—4,5% Cu 0,64% Mn 0,63% Mg 0,84% Fe 0,22% Si	39	Netedă	8	Zn	—	Soluție NaCl 3%	0,71
						Zn+lac de cauciuc	—		0,65
						Cd	—		<0,5

Tabela 5.10

Efectul agenților corosivi asupra rezistenței la oboseală a pieselor cu diverse tratamente anticorrosive [75]

Materialul piesei		Protecția anticorrosivă	Grosimea stratului mm	N _B cicluri	γ
Denumirea	σ_r kgf/mm ²				
Oțel carbon cu 0,3—0,5% C	—	Acoperire galvanică	0,005—0,015	10 ⁷	0,25—0,45
			0,015—0,030	10 ⁷	0,8—0,95
		Metalizare	0,050	2·10 ⁷	0,8
		Rulare	—	10 ⁷	1,00*)
Oțel crom-nichel-molibden	70—120	Nitrurare	—	10 ⁷	1,2—1,4*)
			—	5·10 ⁷	0,65—0,60
Duraluminu	—	Acoperire cu aluminiu	0,075	5·10 ⁷	0,55
		Oxidare anodică, plus lac de cauciuc	—	5·10 ⁷	1,0
		Acoperire cu lano-lină	—	5·10 ⁷	0,5

*) Încercări în apă dulce. Restul datelor se referă la încercări în apă cu 3% NaCl.

5.6. FORME CONSTRUCTIVE CARE MICȘOREAZĂ PERICOLUL DE RUPERE PRIN OBOSEALĂ

În afara tratamentelor de suprafață, rezistența la oboseală a pieselor mai poate fi îmbunătățită dându-le anumite forme constructive, care să micșoreze efectul concentratorilor de eforturi unitare. În cele ce urmează se dau câteva exemple de acest fel, după lucrarea [57]:

a. **Arbori cu variații de diametru.** Cu ocazia studiului coeficienților de concentrare, s-a văzut că la concentratorii arborilor, de felul celor din fig. 5.24, au loc creșteri sensibile ale eforturilor unitare. În desen, fenomenul a fost ilustrat prin îndesirea liniilor de forță, prin analogie cu fenomenele similare din mecanica fluidelor.

În cazul cînd este posibil, raza de racordare se va lua cît mai mare. Dacă trecerea de la diametrul D la d se face pe o lungime mare de arbore (mai mare decît d) fenomenul de concentrare dispăre aproape complet. Acest lucru nu este posibil totdeauna, din motive constructive. Dacă raza inelului de rulment din fig. 5.25

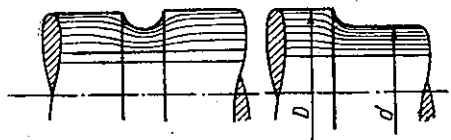


Fig. 5.24.

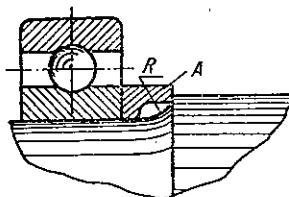


Fig. 5.25.

este mică, deci nu se poate monta pe piesă cu rază mare de racordare, problema se poate rezolva prin folosirea inelului intermediar A , care permite o rază R relativ mare. Dacă nu este posibilă această soluție, se face o rază R relativ mare în scobitură, ca în fig. 5.26 sau 5.27.

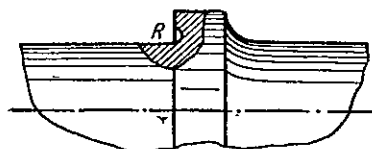


Fig. 5.26.

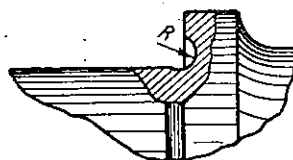
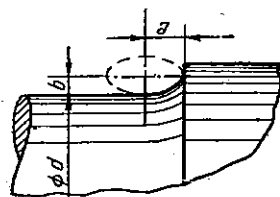


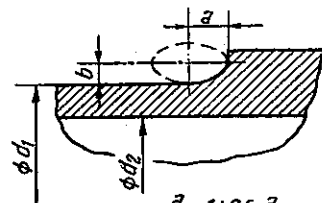
Fig. 5.27.

O soluție a problemei este și racordarea eliptică, cu rază de curbura variabilă, ale cărei cote se dau în fig. 5.28 pentru arbore plin și în fig. 5.29 pentru cel gol. Soluția este costisitoare și se



$$\frac{a}{b} = 1 + 2.5 \frac{a}{d}$$

Fig. 5.28.



$$\frac{a}{b} = 1 + 2.5 \frac{a}{d_1 - d_2}$$

Fig. 5.29.

va aplica numai la piese importante. În cazul pieselor care nu permit o rază de racordare mare, micșorarea eforturilor unitare se realizează printr-un canal de descărcare, practicat în partea

groasă a arborelui, în apropierea racordării (fig. 5.30). În acest fel se face o uniformizare a rigidității arborelui în porțiunile A și B , avînd ca efect micșorarea efectului de concentrare.

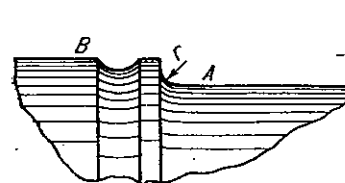


Fig. 5.30.

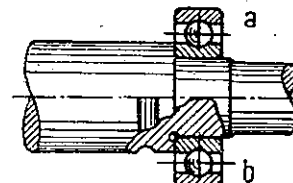


Fig. 5.31.

În fig. 5.31 se arată, în partea de sus construcția obișnuită pentru așezarea rulmentului, a , iar în partea de jos o soluție mai avantajoasă, b . La toate exemplele date, se obțin rezultate favorabile prin tratamente mecanice superficiale.

b. Arbori cu găuri transversale și longitudinale. O gaură transversală în arbore (fig. 5.32, a), este un concentrator puternic. Se poate micșora efectul de concentrare printr-o alezare conică (fig. 5.32, b), printr-o țesătură plană rulată (fig. 5.32, c) sau prin presarea cu o bilă a marginii găurii (fig. 5.32, d). Se mai poate micșora efectul găurii prin executarea unor șanțuri de descărcare (fig. 5.33, a) sau prin îngroșarea porțiunii cu gaură (fig. 5.33, b).

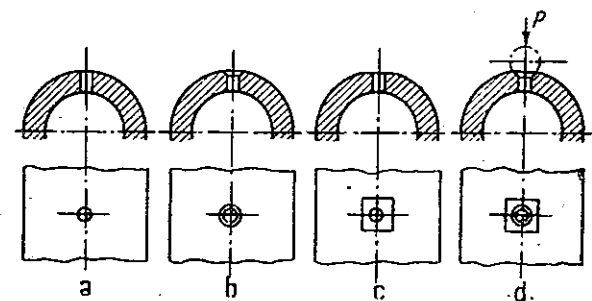


Fig. 5.32.

O osie de vagon găurită longitudinal (fig. 5.34) rezistă în bune condiții dacă grosimea pereților este uniformă în lungul ei.

c. Arbori cotiți. Arborii cotiți sînt unele dintre cele mai interesante piese, din punctul de vedere al solicitărilor la oboseală.

Studiile se fac numai pe piese în mărime naturală. În tabelele 5.11 și 5.12 se dau rezultatele încercărilor la oboseală pe diferiți arbori cotiți de motoare. Valorile rezistențelor la oboseală σ_{-1P} se deter-

mină în manivelă, iar τ_{-1P} în fusuri. Se vede că arborii are la răsucire numai 28—42%, iar la încovoiere 27—46% din rezistența la oboseală a materialului.

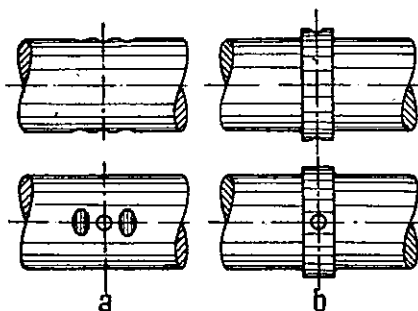


Fig. 5.33.



Fig. 5.34.

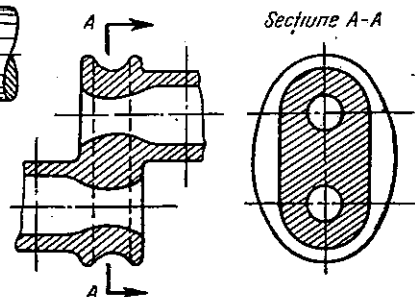


Fig. 5.35.

Scăderea se datorește coeficientului de concentrare β_k al arborelui. Ca raze de racordare între manivelă și părțile cilindrice se iau $r = (0,05 \dots 0,06) d$, unde d este diametrul fusului.

În fig. 5.35 se arată o construcție rațională a arborelui cotit, la care, prin găurile și prin șanțul de descărcare din manivelă, se realizează mărirea rezistenței la oboseală și micșorarea greutății.

Tabela 5.11

Rezistențe la oboseală prin răsucire ale unor arbori cotiți

Felul arborelui	Materialul arborelui	Caracteristicile materialului		Diametrul arborelui d mm	Rezistența la oboseală a arborelui τ_{-1P} kgf/mm ²	Raportul $\frac{\tau_{-1P}}{\tau_{-1}}$
		σ_r kgf/mm ²	τ_{-1} kgf/mm ²			
De avion	Oțel CrNiWo	124	35	80—90	13	0,37
De avion	Oțel CrNiWo	100	28	80—90	9	0,32
De automobil	Oțel CrNiMo	95	26	46	11	0,42
De motor Diesel	Oțel cu 0,45% C Oțel carbon	60	15	245*)	4,2	0,28

*) Racordarea între manivelă și părțile cilindrice cu raza $r = \frac{d}{16,3} = 15$ mm.

Tabela 5.12

Rezistențe la oboseală prin încovoiere ale unor arbori cotiți

Felul arborelui	Materialul arborelui	Caracteristicile materialului		Diametrul arborelui d mm	Rezistența la oboseală a arborelui σ_{-1P} kgf/mm ²	Raportul $\frac{\sigma_{-1P}}{\sigma_{-1}}$
		σ_r kgf/mm ²	σ_{-1} kgf/mm ²			
De automobil	Oțel cu 0,45% C	95	≈ 45	47	12	0,27
De motor Diesel	Oțel CrNi	90	≈ 45	68	16	0,36
De motor Diesel	Oțel CrNiMo	104	≈ 50	50	17	0,34
De motor Diesel	Oțel carbon	60	≈ 26	165	12	0,46
De avion	Oțel aliat	120	≈ 55	80—90	23	0,42

În fig. 5.36 sînt redată diferite forme constructive de arbori cotiți, iar în tabelele 5.13 și 5.14 se dau rezultatele încercărilor la oboseală făcute cu ei. În tabela 5.13 se arată rezultatele încer-

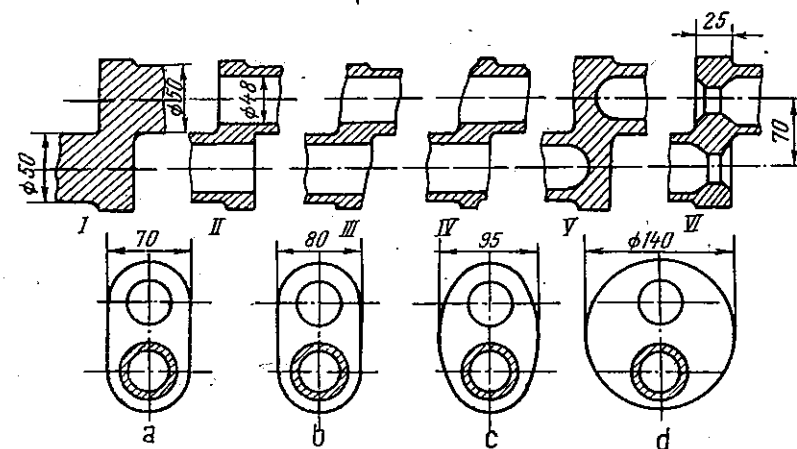


Fig. 5.36.

cărilor pe arbori de diferite tipuri, făcuți din același oțel carbon cu $\sigma_r = 70$ kgf/mm² și $\sigma_c = 54,3$ kgf/mm². În tabela 5.14 se arată rezultatele obținute cu un singur tip de arbore, făcut din diferite materiale.

Tabela 5.13

Rezistențe la oboseală ale unor arbori cotiți [57]

Felul arborelui			Felul arborelui		
Secțiune longitudinală	Secțiune transversală	τ_{-1P} kgf/mm ²	Secțiune longitudinală	Secțiune transversală	τ_{-1P} kgf/mm ²
I	a	4,42	V	a	14,3
II III IV	a	8,36	VI	a	13,8
II III IV	b	11,8	VI	b	14,7
II III IV	c	13,3	VI	c	15,6
II III IV	d	14,3	VI	d	15,6

Tabela 5.14

Rezistența la oboseală a arborilor de tipul IV a, făcuți din diferite materiale [57]

Materialul arborelui	τ_{-1P} kgf/mm ²
Fontă puțin aliată	4,42
Fontă aliată puternic	5,12
Fontă oțelită	6,74
Oțel forjat cu $\sigma_r=70$ kgf/mm ² , $\sigma_c=62$ kgf/mm ²	6,98
Oțel forjat cu $\sigma_r=101$ kgf/mm ² , $\sigma_c=93$ kgf/mm ²	8,85
Oțel forjat cu $\sigma_r=124$ kgf/mm ²	13,0

Prin niturare, rezistențele la oboseală ale arborilor cotiți cresc cu 30—60%. Se va evita o prelucrare mecanică ulterioară niturării (găurire, șlefuire), care este foarte dezavantajoasă, putînd reduce la jumătate rezistența la oboseală a arborelui.

d. Montaje presate. Se obțin reduceri sensibile ale coeficienților

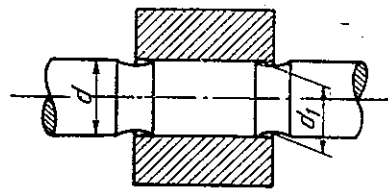


Fig. 5.37.

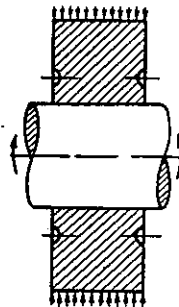


Fig. 5.38.

de concentrare ai montajelor presate, executînd canale de descărcare în arbore (fig. 5.37), cu diametrul d_1 numai cu cîteva zecimi de milimetru inferior lui d . Rezultate bune se obțin și prin

micșorarea rigidității butucului, cu ajutorul unor șanțuri de descărcare (fig. 5.38).

e. Șuruburi și piulițe. La piesele avînd filet, efectul de concentrare a eforturilor unitare este foarte puternic. Din acest motiv, s-au studiat numeroase soluții de ameliorare. În general, locul cel mai solicitat este la primele spire, care preiau maximum din sarcina transmisă între șurub și piuliță.

O construcție logică este cea din fig. 5.39, la care forța se aplică la mijlocul lungimii piuliței, asigurînd o repartizare uniformă a solicitării pe spirele filetului. În fig. 5.40 se arată o

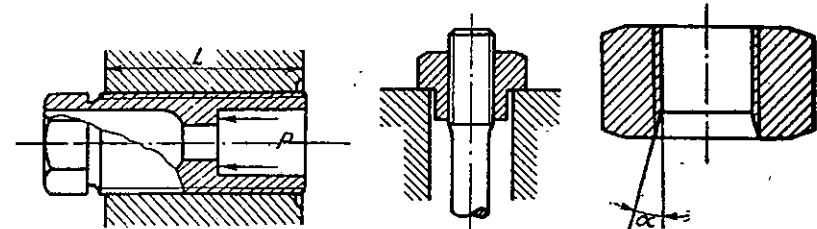


Fig. 5.39.

Fig. 5.40.

Fig. 5.41.

construcție la care jumătate din lungimea piuliței este întinsă, iar cealaltă jumătate comprimată. În fig. 5.41 s-a practicat un alezaj conic, care asigură o descărcare a primelor spire, cele mai solicitate.

În fig. 5.42 sînt arătate trei construcții de piulițe: A — construcție obișnuită; B — piuliță de egală rezistență, care ușurează filetul în partea unde piulița este mai puțin rigidă; C — piuliță de egală rezistență și șurub cu gaură conică.

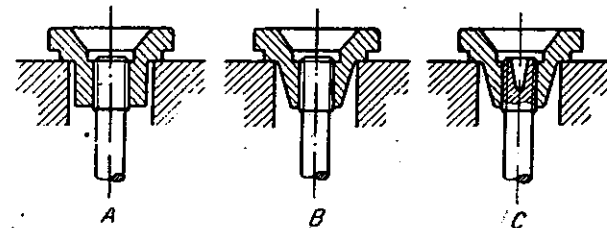


Fig. 5.42.

Construcțiile raționale de șuruburi sînt acelea la care diametrul interior al filetului este egal cu diametrul părții nefiletate, sau chiar ușor superior (în fig. 5.43, $d_c < d_1$).

Se realizează o micșorare sensibilă a coeficientului de concentrare β_k prin rotunjirea fundului filetului. De asemenea, filetul metric fin are coeficienți de concentrare inferiori celui normal.

f. **Șanțuri de pană.** Un șanț de pană terminat la capăt printr-o racordare este mai avantajos decât cel terminat prin unghi drept. O construcție total greșită, care produce fisura A, este cea din

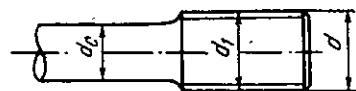


Fig. 5.43.

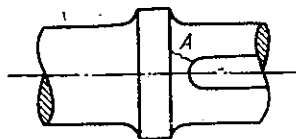
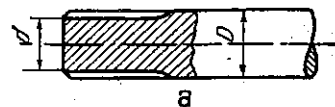


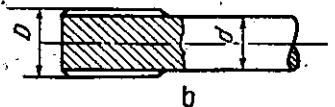
Fig. 5.44.

fig. 5.44, unde se întâlnesc doi concentratori prea apropiați: canalul de pană și racordarea arborelui. La arborii canelați (fig. 5.45) este mult mai avantajoasă forma b, la care diametrul arborelui este egal cu cel din fundul canelurilor.

În ce privește forma canelurilor, din fig. 4.29 se vede avantajul pe care îl prezintă cele cu profil în evolută.



a



b

Fig. 5.45.

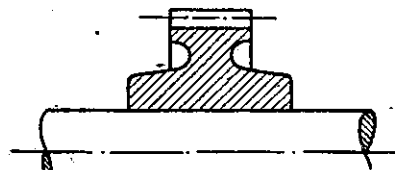


Fig. 5.46.

g. **Roți dințate.** Se realizează o micșorare a coeficienților de concentrare la rădăcina dinților, executând în disc scobituri ca în fig. 5.46, sau făcând roata cu spițe.

h. **Rulmenți.** Este de preferat o construcție cu bile mici și dese, decât una cu bile mari și rare, deoarece prima dă o încărcare mai uniformă a inelului. Inelul interior al rulmentului, construit cu șanțuri laterale de descărcare, contribuie la micșorarea coeficientului de concentrare al arborelui pe care este montat.

Capitolul 6

CALCULUL DE REZISTENȚĂ LA SOLICITĂRI VARIABILE

6.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Expunerea din capitolele anterioare a avut rolul de a stabili materialul documentar necesar calculului de rezistență la solicitări variabile. Rezumativ, acest material documentar cuprinde date numerice referitoare la:

— ciclul de solicitări variabile (nominale)

σ_{max} , σ_{min} , σ_m , σ_v , R , respectiv τ în loc de σ ;

— proprietățile mecanice la solicitări statice și variabile ale materialului piesei

σ_r , σ_c , σ_{-1} , σ_0 , σ_{-1t} , σ_{0t} , τ_{-1} , τ_0 ;

— coeficienții care țin seamă de schimbarea rezistenței la oboseală, la trecerea de la epruvetă la piesă

β_k , ϵ , γ .

Calculul de rezistență la solicitări variabile se poate face pe două căi: fie prin metoda verificării coeficientului de siguranță al unei piese antecalculată în mod aproximativ, fie prin metoda clasică a rezistenței admisibile. Cum însă, așa cum se va vedea ulterior, în determinarea rezistenței admisibile intră mărimile σ_v , σ_m , β_k , ϵ , γ , care necesită cunoașterea dimensiunilor piesei, rezultă că și în metoda rezistenței admisibile este necesară o dimensionare prealabilă aproximativă. În acest mod, metoda verificării coeficientului de siguranță apare drept cea mai comodă. Verificarea va fi urmată de corectări ale dimensiunilor piesei, pînă la obținerea coeficientului de siguranță dorit.

Calculul coeficientului de siguranță prezintă aspecte diferite, după cum este vorba de cicluri staționare — solicitări simple prin cicluri simetrice sau asimetrice, solicitări compuse — sau solicitări prin cicluri nestaționare. Metodele de calcul vor fi examinate pe rând.

Cele mai uzuale calcule la solicitări variabile se referă la ciclurile staționare, întâlnite — ca o simplificare a modului de solicitare — în multe piese de mașini.

Conform definiției generale, coeficientul de siguranță, în rezistența materialelor, este raportul între o stare critică de solicitare posibilă a piesei — ducând la rupere sau la deformări nepermise — și starea reală de solicitare. În calculul la solicitări variabile, se consideră două stări critice:

1. **Ruperea prin oboseală.** În acest caz, coeficientul de siguranță este

$$c = \frac{\sigma_R}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{max L}}{\sigma_{max}}, \quad (6.1)$$

adică raportul între rezistența la oboseală a ciclului limită similar celui real și efortul unitar maxim din piesă, în timpul solicitării variabile.

2. **Atingerea limitei de curgere,** care duce la expresia coeficientului de siguranță

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}}. \quad (6.2)$$

Se va vedea, în cursul expunerii, că este nevoie a se calcula, după caz, unul sau celălalt din coeficienți.

6.2. REGIMURI STAȚIONARE DE SOLICITĂRI SIMPLE

6.2.1. Solicitări prin cicluri simetrice

În acest caz, coeficientul de siguranță la oboseală compară rezistența la oboseală a piesei cu efortul unitar maxim din piesă ($\sigma_{max} = \sigma_v$)

$$c = \frac{\sigma_{-1P}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{-1P}}{\sigma_v}, \quad (6.3)$$

respectiv, pentru răsucire

$$c = \frac{\tau_{-1P}}{\tau_{max}} = \frac{\tau_{-1P}}{\tau_v}, \quad (6.4)$$

Arareori se cunoaște rezistența la oboseală a piesei reale. Dacă se cunoaște rezistența la oboseală a materialului piesei σ_{-1} și se determină coeficienții β_k , ϵ , γ , atunci rezistența la oboseală a piesei reale este

$$\sigma_{-1P} = \frac{\epsilon \gamma}{\beta_k} \cdot \sigma_{-1},$$

iar coeficientul de siguranță devine

$$c = \frac{\frac{\epsilon \gamma}{\beta_k} \cdot \sigma_{-1}}{\sigma_v} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot \sigma_v}. \quad (6.5)$$

Dacă se cunoaște coeficientul de concentrare complex al piesei, care include efectul concentratorului, al dimensiunilor și al stării suprafeței

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma}, \quad (6.6)$$

atunci expresia coeficientului de siguranță devine

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v}. \quad (6.7)$$

În expresia lui β_{kP} , unii dintre coeficienții β_k , ϵ , γ pot fi, după caz, egali cu unitatea. În toate relațiile anterioare, pentru solicitări de întindere-compresiune se înlocuiește σ_{-1} prin σ_{-1t} , iar pentru răsucire σ prin τ .

Din relațiile anterioare se poate determina și rezistența admisibilă la solicitarea prin ciclu simetric, făcând $\sigma_{max} = \sigma_a$:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1} \frac{\epsilon \gamma}{\beta_k}}{c} = \frac{\sigma_{-1}}{c \beta_{kP}}. \quad (6.8)$$

Expresiile

$$\sigma_{ve} = \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot \sigma_v = \beta_{kP} \sigma_v \quad (6.9)$$

poartă numele de *efort unitar maxim echivalent* lui σ_v .

În tabela 6.1 s-a făcut o sistematizare a formulelor de mai înainte, pentru diferite solicitări prin ciclu simetric.

Tabela 6.1

Formule de calcul pentru solicitări variabile prin ciclu simetric

Rezistența la oboseală determinată pe	Coefficientul de concentrare determinat pe	Solicitarea	Coefficientul de siguranță c	Rezistența admisibilă $\sigma_a (\tau_a)$	Efortul unitar echivalent lui $\sigma_v (\tau_v)$
Piesa reală σ_{-1P} σ_{-1tP} τ_{-1P}	—	Întindere-compresiune	$\frac{\sigma_{-1tP}}{\sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1tP}}{c}$	σ_v
		Încovoiere	$\frac{\sigma_{-1P}}{\sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1P}}{c}$	σ_v
		Răsucire	$\frac{\tau_{-1P}}{\tau_v}$	$\frac{\tau_{-1P}}{c}$	τ_v
Epruveta standardizată σ_{-1} σ_{-1t} τ_{-1}	Epruveta standardizată β_k	Întindere-compresiune	$\frac{\sigma_{-1t}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1t} \frac{\varepsilon\gamma}{\beta_k}}{c}$	$\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v$
		Încovoiere	$\frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1} \frac{\varepsilon\gamma}{\beta_k}}{c}$	$\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v$
		Răsucire	$\frac{\tau_{-1}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \tau_v}$	$\frac{\tau_{-1} \frac{\varepsilon\gamma}{\beta_k}}{c}$	$\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \tau_v$
	Piesa reală β_{kP}	Întindere-compresiune	$\frac{\sigma_{-1t}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1t}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \sigma_v$
		Încovoiere	$\frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \sigma_v$
		Răsucire	$\frac{\tau_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \tau_v}$	$\frac{\tau_{-1}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \tau_v$
	Piesa reală β_{kP}	Întindere-compresiune	$\frac{\sigma_{-1t}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1t}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \sigma_v$
		Încovoiere	$\frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v}$	$\frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \sigma_v$
		Răsucire	$\frac{\tau_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \tau_v}$	$\frac{\tau_{-1}}{\beta_{kP} \cdot c}$	$\beta_{kP} \tau_v$

6.2.2. Solicitări prin cicluri asimetrice

6.2.2.1. Criterii de similitudine și de determinare a coeficientului de siguranță

Studiul coeficientului de siguranță la solicitări staționare prin cicluri asimetrice se lovește de unele dificultăți, care au dat foarte mult de lucru cercetătorilor și care au fost soluționate în moduri diferite. Aceste dificultăți se referă la trei aspecte ale problemei.

a. Dat fiind ciclul real din piesă, definit prin eforturile unitare nominale σ_m , σ_v și reprezentat prin punctul M din fig. 6.1, se pune întrebarea: care va fi ciclul limită L cu care trebuie să comparăm ciclul real spre a afla coeficientul de siguranță? Răspunsul la întrebare se obține dacă se cercetează modul cum va evolua solicitarea în piesă, la depășirea ciclului real, și trecerea spre ciclul limită. Așa cum se arată în fig. 6.1, dacă modul de funcționare a mașinii stabilește această trecere, după o anumită lege (de exemplu $\sigma_{max} = \text{const}$, $\sigma_{min} = \text{const}$, $\sigma_m = \text{const}$, $\sigma_v = \text{const}$, $R = \text{const}$ etc.), atunci se poate afla ușor ciclul limită.

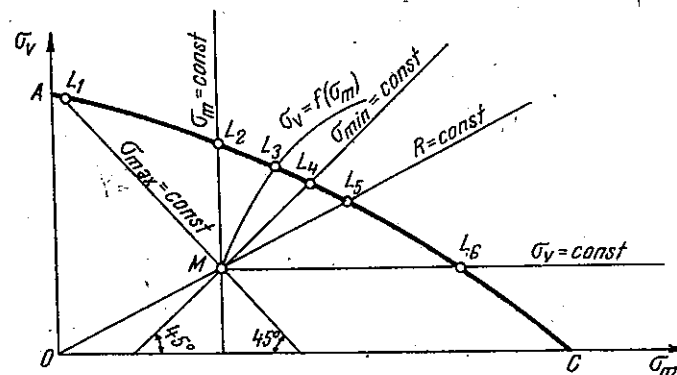


Fig. 6.1.

În general acest studiu, al trecerii de la ciclul M la ciclul L , este dificil. De aceea, diferiții cercetători au căutat să admită anumite legi de trecere, pe baza cărora să se afle ciclul limită. Astăzi, majoritatea metodelor de calcul admit că trecerea de la ciclul real la ciclul limită s-ar face cu păstrarea coeficientului de asimetrie constant ($R = \text{const}$). Aceasta echivalează, atât în diagrama Haigh (fig. 6.1), cât și în diagrama Smith, în a uni originea cu punctul reprezentativ al ciclului M (la diagrama Smith cu punctul ce reprezintă pe σ_{max}) și a prelungi linia pînă la intersecția cu dia-

grama ciclurilor limită. Se obține astfel punctul L_5 din fig. 6.1. Alte metode, în special în literatura tehnică germană, admit că trecerea de la M la L se face păstrând constant efortul unitar mediu σ_m : se obține astfel punctul L_2 din fig. 6.1. Kimelman, în lucrările sale [14], [29], studiază curba de variație $\sigma_v = f(\sigma_m)$ la trecerea de la ciclul real la ciclul limită, obținând punctul L_3 . Metoda, mai corectă decât cele anterioare, este greoaie. În cazuri particulare, ea poate coincide cu cele anterioare. Este evident că diferitele poziții ale ciclului limită L vor duce la valori diferite ale coeficientului de siguranță.

b. A doua problemă este cea a definirii coeficientului de siguranță. Majoritatea metodelor definesc coeficientul de siguranță ca raport între efortul unitar maxim al ciclului limită L , similar celui real, și efortul unitar maxim al ciclului

$$c = \frac{\sigma_{max L}}{\sigma_{max}} \quad (6.10)$$

Există însă metode care definesc coeficientul de siguranță numai pe baza amplitudinilor ciclurilor

$$c = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v} \quad (6.11)$$

În anumite cazuri, care se vor arăta în continuare, cele două moduri de calcul coincid; în altele, ele dau rezultate diferite.

c. Cunoscînd ciclul limită L , coeficientul de siguranță se poate determina pe cale grafico-analitică, măsurînd pe desen pe σ_{mL} și σ_{vL} . Cele mai multe metode de calcul caută a înlocui construcția grafică prin calcul analitic, folosind diagrame ale ciclurilor limită schematizate prin linii drepte, cum s-a arătat la cap. 2. În acest caz, relațiile de calcul diferă de la o metodă la alta, după schematizarea folosită.

În cele ce urmează se vor prezenta unele dintre metodele de calcul cunoscute, arătînd care sînt cele mai uzuale.

6.2.2.2. Metode bazate pe criteriul de asemănare $R = \text{constantă}$

a. Metode grafico-analitice. Se presupune, pentru moment, că se cunoaște curba ciclurilor limită pentru piesa reală — ABC din fig. 6.2 — sau că se face calculul pentru o epruvetă. Se trasează, pe același desen, linia DD' , determinată de limita de curgere.

Dacă ciclul real din piesă este M_1 , ducînd linia OM_1 ($R = \text{const}$) se găsește ciclul limită similar lui L_1 , pe curba ABC ,

ca și solicitarea statică de comparație, reprezentată de punctul P_1 . Coeficientul de siguranță la oboseală este

$$c = \frac{\sigma_{max L}}{\sigma_{max}} = \frac{OL'_1 + L'_1 L_1}{OM'_1 + M'_1 M_1} = \frac{OL'_1}{OM'_1} = \frac{L'_1 L_1}{M'_1 M_1} = \frac{OL_1}{OM_1} = \frac{\sigma_{mL}}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v} \quad (6.12)$$

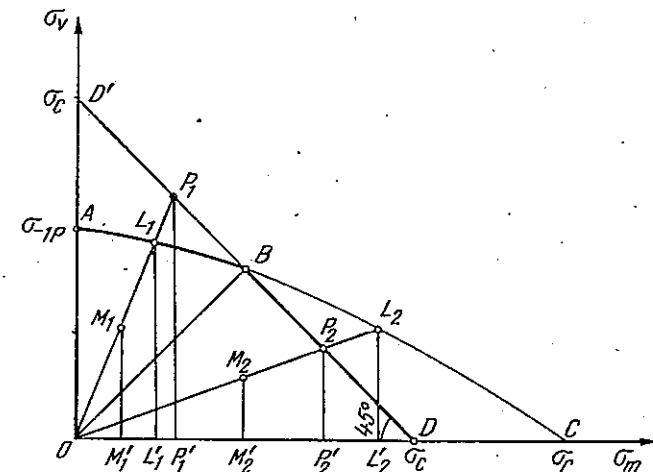


Fig. 6.2.

Se observă că în acest caz coeficienții dați de formulele (6.10) și (6.11) sînt identici. Coeficientul de siguranță față de limita de curgere este

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{OP'_1 + P'_1 P_1}{OM'_1 + M'_1 M_1} \quad (6.13)$$

Conform desenului, cît timp ciclul M_1 se află în interiorul conturului OAB , rezultă $c_c > c$. Din contra, pentru un ciclu situat sub linia OB , adică M_2 , rezultă $c_c < c$. Ca regulă generală, se va lua în considerare, la metale tenace, cel mai mic dintre acești coeficienți; cu alte cuvinte, pentru cicluri aflate deasupra liniei OB se va face calculul la oboseală, iar pentru cicluri sub linia OB , calculul față de limita de curgere.

Considerații similare se pot face cu ajutorul fig. 6.3, sau al oricărei diagrame schematizate. Pentru ciclul M_1 se scrie

$$c = \frac{\sigma_{max L}}{\sigma_{max}} = \frac{L'_1 L_1}{M'_1 M_1} \quad (6.14)$$

iar pentru ciclul M_2

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{L'_2 L_2}{M'_2 M_2} \quad (6.15)$$

Conform metodei germane, în care se compară numai amplitudinile ciclurilor variabile, rezultă, pentru ciclul L_1

$$c = \frac{\sigma_v L}{\sigma_v} = \frac{L_1 L_2}{m_1 M_1}, \quad (6.16)$$

în timp ce pentru ciclul L_2 rămîne valabilă formula (6.15), fiind vorba de un calcul static.

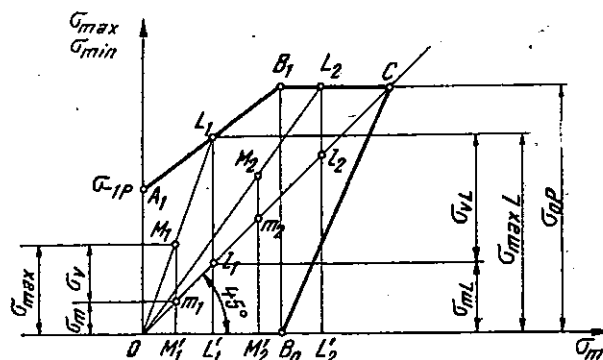


Fig. 6.3.

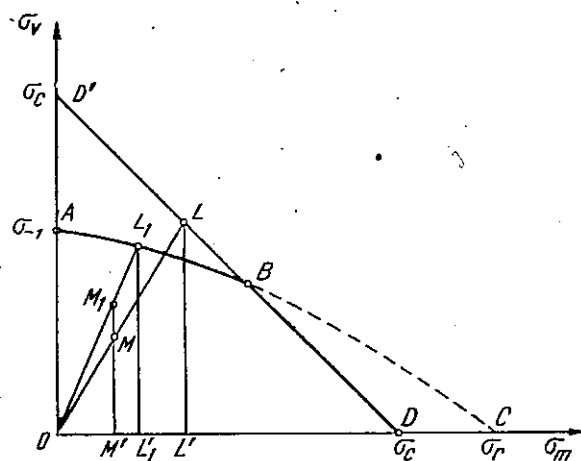


Fig. 6.4.

Dacă se cunoaște diagrama ciclurilor limită — schematizată sau neschematizată — pentru epruveta standardizată și se caută coeficientul de siguranță al piesei reale, atunci metoda grafică este arătată de fig. 6.4. Dacă punctul M reprezintă ciclul real,

atunci se amplifică amplitudinea sa cu coeficienții β_k , ϵ , γ (ceea ce este același lucru cu a micșora pe σ_v) obținînd ordonata

$$\sigma'_v = M' M_1 = \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot \sigma_v = \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot M' M.$$

În acest fel, pentru calculul la oboseală, ciclul este reprezentat de punctul M_1 , avînd același σ_m cu ciclul real, dar σ_v mărit. Ducînd linia $OM_1 L_1$ se află ciclul limită, iar coeficientul de siguranță la oboseală este

$$c = \frac{\sigma_{max L_2}}{\sigma_{max M_1}} = \frac{OL'_1 + L'_1 L_1}{OM' + M' M_1} = \frac{\sigma_{max L_1}}{\frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \sigma_v + \sigma_m}.$$

Din contra, dacă se calculează coeficientul de siguranță față de limita de curgere, se face calcul static, deci nu se aplică coeficienții de corecție. Atunci ciclul limită este L , iar coeficientul de siguranță

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{OL' + L' L}{OM' + M' M}.$$

Metoda indicată se poate aplica identic și pe diagrama de tip Smith, ca și pe orice altă diagramă, cînd se folosește criteriul de asemănare $R = \text{const.}$

Pentru aplicarea metodei Kimelman, se va urmări fig. 6.5. Se caută relațiile analitice care exprimă pe σ_v și σ_m în funcție de sarcina P (respectiv P_{max} și P_{min}), de momentul încovoietor etc. Se interpretează modul cum poate crește sarcina P , dacă ciclul real este depășit și se construiesc curbele $\sigma_v = f_1(P)$, $\sigma_m = f_2(P)$, ca în fig. 6.5, a.

Luînd pe abscisa fig. 6.5, a o serie de puncte 0, 1, 2, 3, ... se poate construi curba $\sigma_v = f(\sigma_m)$ din fig. 6.5 b, pînă ce intersectează curba ciclurilor limită în L . Se figurează, pe curba construită, punctul reprezentativ M al ciclului real. Se observă pe desen că dacă punctul B din fig. 6.5 a este la intersecția celor două curbe ($\sigma_v = \sigma_m$), atunci în fig. 6.5, b el se află pe linia la 45°. Kimelman definește coeficientul de siguranță prin raportul între sarcina P_L , corespunzătoare punctului L și sarcină reală din piesă

$$c = \frac{P_L}{P}. \quad (6.17)$$

Numai în cazul cînd între sarcini și eforturi unitare sînt relații de proporționalitate, formula (6.17) se poate înlocui prin (6.1).

Diagrama ciclurilor limită, la metoda Kimelman, se bazează pe încercarea pieselor reale. Ea are la extreme pe σ_{-1P} și σ_{rP} . (σ_{rP} diferă de σ_r dacă piesa are concentratori.) Ea poate fi schematizată după orice metodă.

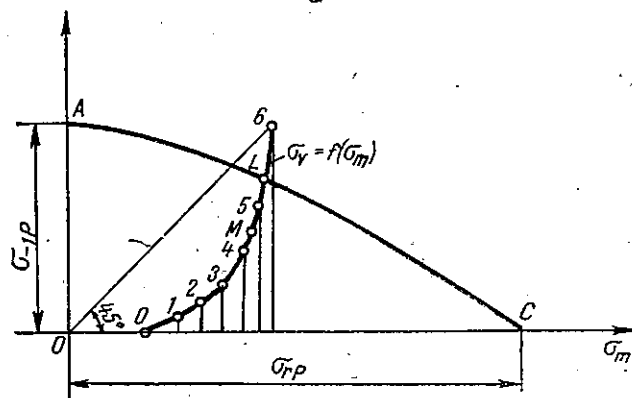
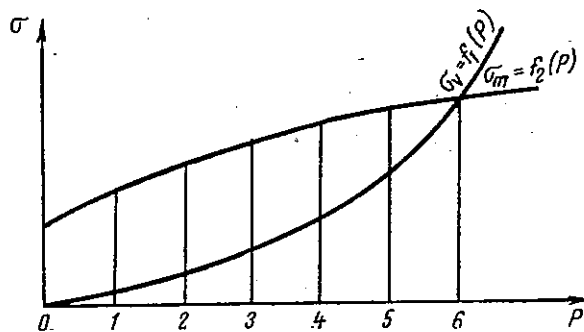


Fig. 6.5.

b. Diagrama schematizată după o linie dreaptă. Metoda Soderberg. Dacă se folosește diagrama schematizată prin valorile σ_{-1} , σ_r (fig. 6.6), ciclul limită se găsește pe linia OML. Se duce linia A'MC', care reprezintă locul geometric al ciclurilor cu coeficient de siguranță $c = \text{const}$, pe cînd linia ciclurilor limită corespunde la $c = 1$. Coeficientul de siguranță la oboseală este

$$c = \frac{\sigma_{\max} L}{\sigma_{\max}} = \frac{OL' + L'L}{OM' + M'M} = \frac{OL'}{OM'} = \frac{L'L}{M'M} = \frac{OL}{OM} = \frac{\sigma_{mL}}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v} \quad (6.18)$$

Din asemănarea triunghiurilor $MM'C'$ și AOO , se poate scrie

$$\frac{MM'}{M'C'} = \frac{AO}{OC},$$

respectiv, făcînd înlocuiri, conform desenului,

$$\frac{\frac{\sigma_v}{c} - \sigma_m}{\sigma_r - \sigma_m} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r}.$$

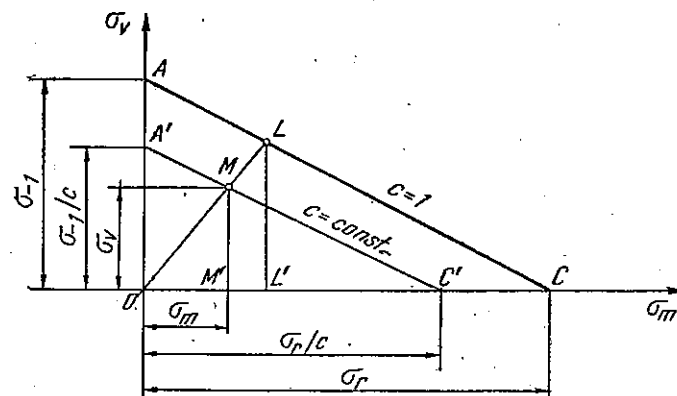


Fig. 6.6

Efectuînd calculul, se obține

$$c = \frac{1}{\frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}} \quad (6.19)$$

Relația (6.19) se aplică materialelor fragile. Pentru metale tenace, în schematizare se înlocuiește σ_r prin σ_c , iar formula (6.19) se transformă în

$$c = \frac{1}{\frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c}} \quad (6.20)$$

Separat, se calculează c_c , cu formula

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_m + \sigma_v} \quad (6.21)$$

și se ia în considerare cel mai mic dintre cei doi coeficienți.

Relațiile stabilite sînt valabile atunci cînd σ_{-1} se referă chiar la piesa reală, adică $\sigma_{-1} = \sigma_{-1P}$. În cazul cînd σ_{-1} se referă la epruvetă, iar calculul se face pentru piesa reală, în relațiile (6.19) și (6.20) rezistența la oboseală se reduce prin aplicarea coeficienților β_k , ε , γ asupra lui σ_{-1} (sau, ceea ce este același lucru, se amplifică σ_v) și se obțin relațiile

$$c = \frac{1}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \cdot \gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}} \quad (6.22)$$

respectiv, pentru metale tenace

$$c = \frac{1}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \cdot \gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c}} \quad (6.23)$$

Evident, dacă se cunoaște coeficientul de concentrare complex β_{kP} , sau rezistența la oboseală a piesei, relațiile de mai înainte devin

$$c = \frac{1}{\frac{\beta_{kP}}{\varepsilon \cdot \gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}} = \frac{1}{\frac{\sigma_v}{\sigma_{-1P}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}} \quad (6.24)$$

$$c = \frac{1}{\frac{\beta_{kP}}{\varepsilon \cdot \gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c}} = \frac{1}{\frac{\sigma_v}{\sigma_{-1P}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c}} \quad (6.25)$$

c. Diagrama schematizată prin linie frîntă. Metoda Serensen.

Se consideră diagrama schematizată prin linie frîntă, ca în fig. 6.7, avînd traseul ABD pentru metale tenace, respectiv ABC pentru cele fragile. Se consideră ciclul real din piesă, M , situat în triunghiul AOB . Se duce prin M linia $A'MB'$, paralelă la linia ciclurilor limită AB . Din asemănarea triunghiurilor AEB și MFB' se poate scrie

$$\frac{AE}{EB} = \frac{MF}{FB'}$$

respectiv

$$\frac{\sigma_{-1} - \frac{\sigma_0}{2}}{\frac{\sigma_0}{2}} = \frac{\sigma_v - \frac{\sigma_0}{2c}}{\frac{\sigma_0}{2c} - \sigma_m}$$

iar, prin transformare, rezultă

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v + \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \sigma_m}$$

Notînd coeficientul caracteristic al materialului

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \quad (6.26)$$

expresia coeficientului de siguranță devine

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v + \psi \sigma_m} \quad (6.27)$$

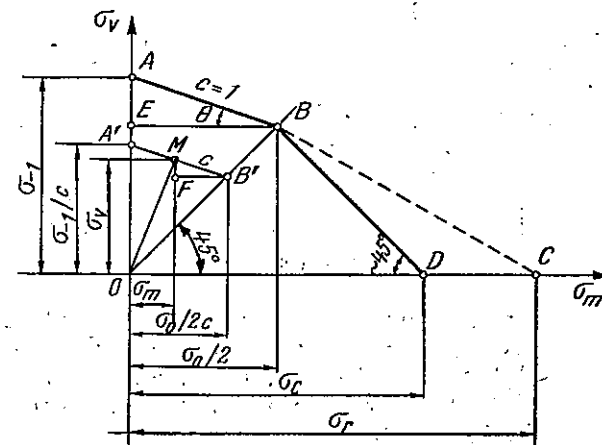


Fig. 6.7.

Se observă pe desen că $\psi = \tan \theta$, ceea ce dă

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v + \tan \theta \sigma_m} \quad (6.28)$$

Relația (6.28), mai generală decît (6.27), se aplică pentru orice schematizare prin linie frîntă, la care se cunoaște θ , punctul B nefiind neapărat ciclul pulsator. Relația (6.27) este datorită lui Serensen. Dacă în această relație σ_{-1} nu este determinat chiar

pe piesă, ci se referă la epruvetă, se aplică coeficienții de corecție și ea devine

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot \sigma_v + \phi \sigma_m} = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_k P \sigma_v + \phi \sigma_m} \quad (6.29)$$

În stabilirea formulei lui Serensen, linia AB din fig. 6.7 este definită de ciclul simetric și de ciclul pulsator. Dacă ciclul real din piesă se află sub linia OB (fig. 6.7), deci are $0 \leq R \leq +1$, iar

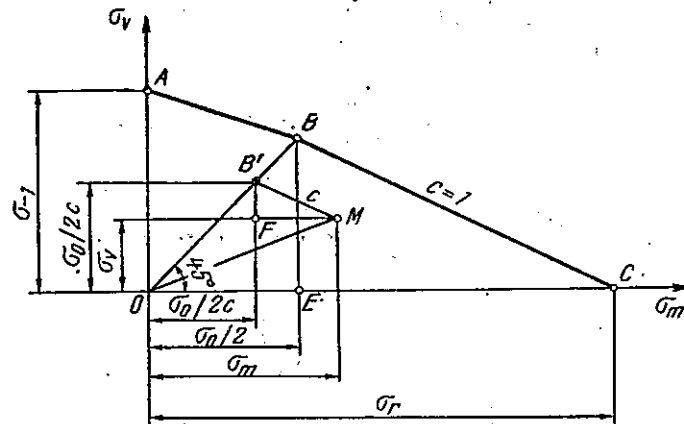


Fig. 6.8.

metalul este tenace, se poate considera că linia BD este aproximativ la 45° ; deci calculul se va face față de limita de curgere, cu formula (6.21). În caz contrar, la metale fragile, se poate lua diagrama schematizată din fig. 6.8, din care, din asemănarea triunghiurilor BEC și $B'FM$ rezultă

$$\frac{BE}{EC} = \frac{B'F}{FM}$$

respectiv, făcând înlocuirile

$$\frac{\frac{\sigma_0}{2}}{\sigma_r - \frac{\sigma_0}{2}} = \frac{\frac{\sigma_0}{2c} - \sigma_v}{\sigma_m - \frac{\sigma_0}{2c}}$$

iar în urma efectuării calculului

$$c = \frac{\sigma_r}{\sigma_v \left(2 \frac{\sigma_r}{\sigma_0} - 1 \right) + \sigma_m}$$

Notînd

$$\xi = 2 \frac{\sigma_r}{\sigma_0} - 1, \quad (6.30)$$

rezultă

$$c = \frac{\sigma_r}{\xi \sigma_v + \sigma_m}$$

Ținînd seamă de coeficienții β_k , ϵ , γ , această relație se transformă în

$$c = \frac{\sigma_r}{\frac{\beta_k}{\epsilon \gamma} \cdot \xi \sigma_v + \sigma_m} \quad (6.31)$$

Relații absolut similare cu cele de mai sus se pot scrie pentru răsucire, înlocuind pe σ prin τ .

Aceeași formulă a lui Serensen se obține și dacă se face raționamentul pe diagrama de tip Smith, schematizată ca în fig. 6.3, cu condiția ca ciclul limită să se afle pe linia A_1B_1 . Dacă el este pe porțiunea orizontală B_1C , calculul se face față de limita de curgere.

După cum s-a arătat și anterior, schematizarea prin metoda Serensen ține seamă mai bine de capacitatea de rezistență a materialului. Ca urmare, coeficienții de siguranță determinați prin această metodă, superiori celor dați de metoda Soderberg, sînt mai apropiați de realitate. Metoda Serensen este cea mai uzuală metodă din literatura tehnică sovietică, fără însă a fi exclusiv folosită.

d. Determinarea coeficientului de siguranță prin compararea amplitudinilor ciclurilor. În literatura tehnică germană și americană, coeficientul de siguranță se definește ca raport între amplitudinea ciclului limită și a celui real

$$c = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v} \quad (6.32)$$

În ce privește asemănarea ciclurilor, se folosește fie criteriul $R = \text{const}$, fie criteriul $\sigma_m = \text{const}$. Admițînd criteriul $R = \text{const}$ și considerînd că diagrama Smith din fig. 6.9 este construită pentru epruveta standardizată, se procedează în felul următor:

Dacă M_1M_2 este ciclul real din piesă, se duce linia OM_1L_1 , care determină ciclul limită similar celui real. Amplificînd pe σ_v prin factorii β_k , ϵ , γ , spre a ține seamă de piesa reală, se obține ciclul $M'_1M'_2$, care trebuie comparat cu cel limită. Se observă că, la

trecerea de la ciclul $M_1\bar{M}_2$ la $M'_1M'_2$, s-a amplificat în raportul $\beta_k/\varepsilon\gamma$ atât amplitudinea cât și efortul unitar mediu

$$\frac{M'_1M'_2}{M_1\bar{M}_2} = \frac{Om'}{Om} = \frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma}$$

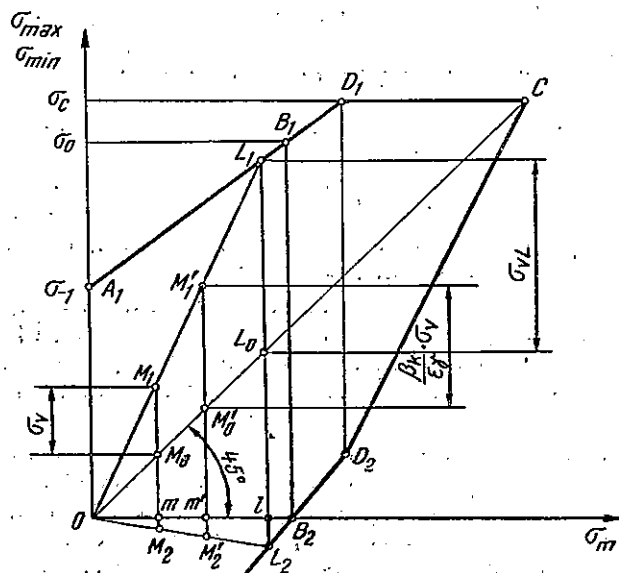


Fig. 6.9.

În baza definiției generale, coeficientul de siguranță la oboseală va fi

$$c = \frac{\sigma_v L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v} = \frac{L_0 L_1}{M'_0 M'_1}$$

Ținând seamă de figurile asemenea, se poate scrie

$$c = \frac{\sigma_v L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_v} = \frac{L_0 L_1}{M'_0 M'_1} = \frac{Ol}{Om'} = \frac{\sigma_m L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_m} = \frac{\sigma_v L + \sigma_m L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} (\sigma_v + \sigma_m)} = \frac{\sigma_{max} L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \cdot \sigma_{max}}$$

Rezultă că prin metoda aceasta coeficientul de siguranță

$$c = \frac{\sigma_{max} L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} (\sigma_v + \sigma_m)} \quad (6.33)$$

pe cînd prin metoda care compară eforturile unitare maxime

$$c = \frac{\sigma_{max} L}{\frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} \sigma_v + \sigma_m} \quad (6.34)$$

Ultima metodă este cea folosită în literatura tehnică sovietică, ilustrată, spre exemplu, prin metoda Serensen. Formula (6.33), aplicînd coeficienții β_k , ε , γ și asupra valorii statice a ciclului (σ_m), duce la coeficienți de siguranță mai mici decît formula (6.34). Cele două relații devin identice cînd diagrama ciclurilor limită se referă la piesa reală; deci nu se mai aplică coeficienții β_k , ε , γ , în care caz, identitatea formulelor rezultă din relația (6.12).

e. Reducerea ciclului asimetric la un ciclu simetric sau la o solicitare statică echivalentă. Formulele stabilite anterior se pot demonstra și altfel, considerînd că s-ar înlocui ciclul asimetric prin unul simetric echivalent, sau printr-o solicitare statică echivalentă. A înlocui ciclul real prin unul echivalent, înseamnă a

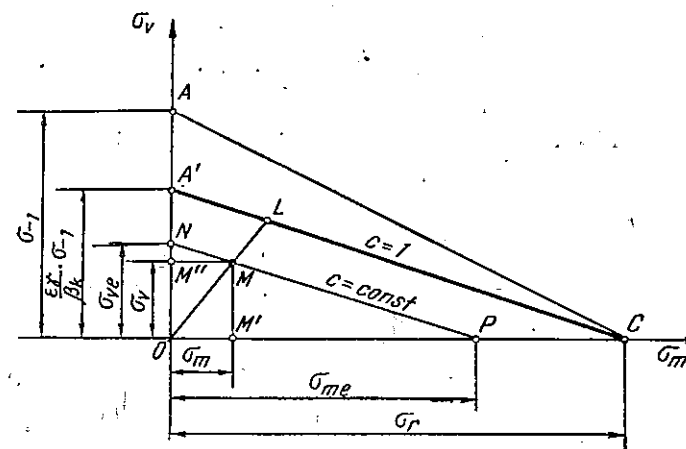


Fig. 6.10.

găsi ciclul echivalent care să aibă același coeficient de siguranță. Dacă se consideră diagrama ciclurilor limită schematizată în modul cel mai simplu, prin linia AC din fig. 6.10 se construiește întîi diagrama pentru piesa reală, reducînd segmentul OA în raportul $\beta_k/\varepsilon\gamma$ și obținînd astfel linia A'C. Ciclul real este reprezentat prin punctul M. Ducînd linia NMMP a ciclurilor cu coeficient de siguranță constant, se află ciclul simetric echivalent,

reprezentat de punctul N , cu $ON = \sigma_{ve}$, sau solicitarea statică echivalentă, dată de P , cu $\sigma_{me} = OP$.

Din triunghiurile asemenea $NM''M$ și $A'OC$ se poate scrie

$$\frac{NM''}{M''M} = \frac{A'O}{OC}$$

sau, prin înlocuiri,

$$\frac{\sigma_{ve} - \sigma_v}{\sigma_m} = \frac{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1}}{\sigma_r},$$

de unde rezultă

$$\sigma_{ve} = \sigma_v + \sigma_m \frac{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1}}{\sigma_r} = ON. \quad (6.35)$$

Conform definiției generale, la ciclul simetric, coeficientul de siguranță

$$c = \frac{OA'}{ON} = \frac{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1}}{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1} + \sigma_r} = \frac{1}{\frac{\beta_k}{s\gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}}.$$

S-a regăsit astfel formula lui Soderberg (6.22).

Solicitarea statică echivalentă se obține din asemănarea triunghiurilor $MM'P$ și $A'OC$

$$\frac{M'P}{M'M} = \frac{OC}{OA'},$$

$$\frac{\sigma_{me} - \sigma_m}{\sigma_v} = \frac{\sigma_r}{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1}},$$

de unde rezultă

$$\sigma_{me} = \sigma_m + \sigma_v \frac{\sigma_r}{\frac{s\gamma}{\beta_k} \sigma_{-1}}. \quad (6.36)$$

Folosind definiția coeficientului de siguranță

$$c = \frac{\sigma_r}{\sigma_{me}} = \frac{OC}{OP},$$

se obține

$$c = \frac{\sigma_r}{\sigma_v \frac{\beta_k}{s\gamma} \cdot \frac{\sigma_r}{\sigma_{-1}} + \sigma_m} = \frac{1}{\frac{\beta_k}{s\gamma} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r}},$$

adică se regăsește formula lui Soderberg.

Procedînd similar, se poate regăsi și formula lui Serensen. Metoda se poate aplica pentru orice diagramă a ciclurilor limită (chiar curbilinie), construind diagrama similară care trece prin punctul M (fig. 6.11).

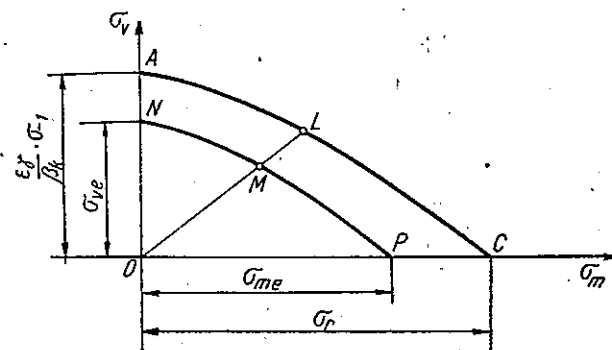


Fig. 6.11.

f. **Rezistențe admisibile.** Uneori este necesar, în calcule, să se stabilească rezistența admisibilă, pentru un anumit tip de piesă și un anumit coeficient de asimetrie. În acest scop, efortul unitar maxim al ciclului se egalează cu rezistența admisibilă

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_v = \sigma_a.$$

Expresia rezistenței admisibile variază după formula de la care se pornește pentru calculul coeficientului de siguranță. Se definește mărimea adimensională

$$k = \frac{\sigma_v}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{1-R}{1+R}, \quad (6.37)$$

numită *caracteristica nominală a ciclului*.

— Pornind de la formula lui Serensen (6.29), se scoate expresia lui σ_v , prin următoarele transformări

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{s\gamma} \cdot \sigma_v + \phi \sigma_m} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v \left[\frac{\beta_k}{s\gamma} + \phi \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \right]} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v \left(\frac{\beta_k}{s\gamma} + \frac{\phi}{k} \right)};$$

$$\sigma_v = \frac{\sigma_{-1}}{c \left(\frac{\beta_k}{s\gamma} + \frac{\phi}{k} \right)}.$$

Adunând pe σ_m , rezultă

$$\sigma_a = \sigma_v + \sigma_m = \sigma_v \left(1 + \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \right) = \sigma_v \left(1 + \frac{1}{k} \right);$$

$$\sigma_a = \frac{\left(1 + \frac{1}{k} \right) \sigma_{-1}}{c \left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} + \frac{\psi}{k} \right)} = \frac{\sigma_{-1}}{c} \cdot \frac{1+k}{k \cdot \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} + \psi} \quad (6.38)$$

O formulă analogă se poate scrie pentru răsucire.

— Începînd calculul cu formula lui Soderberg (6.23) și procedînd la fel, se obține

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{c} \cdot \frac{1+k}{k \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}} \quad (6.39)$$

La materiale fragile, în formula (6.39) se înlocuiește σ_c prin σ_r .

— Printr-o metodă asemănătoare; Popov și Rabinovici au stabilit expresia rezistenței admisibile la solicitări ciclice

$$\sigma_a = \varphi \cdot \sigma_{as}, \quad (6.40)$$

unde σ_{as} este rezistența admisibilă la solicitări statice, iar φ — *coeficientul de reducere a rezistenței admisibile*, avînd expresia

$$\varphi = \frac{1+k}{1+k \cdot \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{-1}}} \quad (6.41)$$

g. Coeficientul de siguranță global. Să considerăm expresia (6.5) a coeficientului de siguranță la solicitări prin ciclu simetric

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_v}$$

care poate fi scrisă și în forma

$$c \cdot \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}$$

Mărimea

$$c_g = c \cdot \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}, \quad (6.42)$$

care compară rezistența la oboseală a epruvetei cu efortul unitar al piesei, poate fi numită coeficient de siguranță global. După cum se vede din relația (6.42), $c_g > c$.

În literatura tehnică, în special în cea sovietică, s-au dezvoltat metode de calcul pe baza coeficientului de siguranță global, aplicate atât ciclurilor simetrice, cât și asimetrice.

S. I. Penkov, în lucrarea [55], definește coeficientul de siguranță global prin relația

$$c_g = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (6.43)$$

în care:

- K_1 este factorul care ține seama de particularitățile materialului și de influența proceselor tehnologice, fiind analog coeficientului c din formula (6.42);
- K_2 — ține seama de eroarea determinării forțelor active, de eroarea formulelor de calcul și de influența sarcinilor suplimentare și întâmplătoare; cînd aceste influențe nu există, se ia $K_2 = 1$; contrar, el poate avea valori $K_2 = 1,1 \dots 2,0$, iar la solicitări prin șoc chiar mai mult;
- K_3 — inversul factorului dimensional ε ;
- K_4 — inversul coeficientului de calitate γ ;
- K_5 — coeficientul de concentrare β_k .

În acest fel, coeficientul de siguranță global la solicitări prin ciclu simetric

$$c_g = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}, \quad (6.44)$$

respectiv rezistența admisibilă a piesei

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{c_g}. \quad (6.45)$$

La solicitări prin cicluri asimetrice, se consideră că ele rezultă din suprapunerea unei solicitări statice și a uneia variabile simetrice. Se definesc cele două *caracteristici ale ciclului sarcinilor*, la solicitarea variabilă și cea statică:

$$n_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2\sigma_{max}} = \frac{P_{max} - P_{min}}{2P_{max}}; \quad (6.46)$$

$$n_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2\sigma_{max}} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2P_{max}}, \quad (6.47)$$

unde P este sarcina, considerată proporțională cu σ .

De asemenea, se definesc coeficienții de siguranță globali pentru ciclul simetric (c_{gv}) și pentru solicitarea statică (c_{gm})

$$c_{gv} = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5; \quad (6.48)$$

$$c_{gm} = K_1 K_2 K_5.$$

Se observă că pentru solicitarea statică nu s-a luat în considerare factorul dimensional și coeficientul de calitate.

Coeficientul de siguranță global al ciclului asimetric

$$c_g = n_m c_{gm} + n_v c_{gv}. \quad (6.49)$$

Între acest coeficient, rezistența la oboseală a ciclului limită și efortul unitar maxim al ciclului real există relația

$$c_g = \frac{\sigma_{max} L}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{max}}, \quad (6.50)$$

din care se determină rezistența admisibilă

$$\sigma_a = \frac{\sigma_R}{c_g}. \quad (6.51)$$

Metoda lui Penkov este puțin răspândită.

Altă variantă de coeficient de siguranță global este cel definit de I. A. Oding [52]

$$c_g = SKTM, \quad (6.52)$$

unde :

S este coeficientul de siguranță al piesei, sau coeficientul „tactic“, dat de trei factori, funcție de material și de destinația piesei;

K — coeficientul de calcul și construcție, format din trei factori ținând seamă de modul de determinare a forțelor, efectul de concentrare a eforturilor unitare și de natura solicitării;

T — coeficientul procesului tehnologic al piesei, dat de produsul a trei factori;

M — coeficientul metodei de încercare a materialului, dat de produsul a doi factori.

Metodele de calcul al coeficientului de siguranță global vădesc intenția autorilor de a analiza cât mai complet factorii ce condiționează siguranța piesei. Prin faptul că numărul acestor factori este mare, deci la alegerea lor se pot cumula erorile, metodele sînt greoaie pentru proiectanți și rar utilizate.

6.2.2.3. Metoda bazată pe criteriul de asemănare ; $\sigma_m = \text{constantă}$

În această metodă, folosită cel mai frecvent în literatura tehnică germană, se admite că trecerea de la ciclul real la ciclul limită se face păstrînd $\sigma_m = \text{const.}$ În fig. 6.12 s-a luat ciclul real reprezentat prin punctul $M_1 M_2$. În prealabil, considerînd $R = \text{const.}$

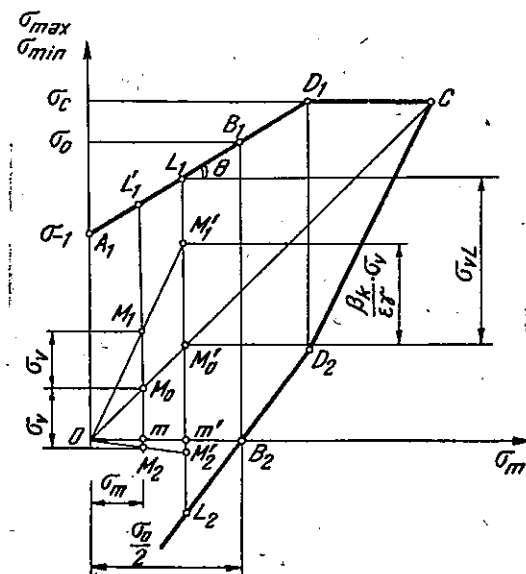


Fig. 6.12.

se află ciclul $M_1' M_2'$, amplificînd coordonatele lui $M_1 M_2$ cu factorul $\beta_k / \epsilon \gamma$. De la ciclul $M_1' M_2'$ se trece la ciclul limită $L_1 L_2$. Prin definiție, coeficientul de siguranță

$$c = \frac{\sigma_v L}{\beta_k \epsilon \gamma \sigma_v} = \frac{M_0' L_1}{M_0' M_1}. \quad (6.53)$$

Folosind diagrama din fig. 6.12, se poate da și o expresie analitică acestui coeficient. Panta liniei $A_1 L_1 D_1$ este

$$\tan \theta = \frac{\sigma_0 - \sigma_{-1}}{\frac{\sigma_0}{2}} = \frac{2(\sigma_0 - \sigma_{-1})}{\sigma_0}.$$

Ca urmare punctul L_1 are ordonata

$$\sigma_{\max L} = m' L_1 = \sigma_{-1} + \sigma_{mL} \operatorname{tg} \theta$$

iar efortul unitar mediu, pentru $L_1 L_2$ și $M_1' M_2'$, este

$$\sigma_{mL} = Om' = \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot Om = \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_m.$$

Amplitudinea ciclului limită

$$\sigma_{vL} = \sigma_{\max L} - \sigma_{mL} = \sigma_{-1} + \sigma_{mL} (\operatorname{tg} \theta - 1) = \sigma_{-1} + \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \sigma_m \left(\frac{2\sigma_0 - 2\sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1 \right).$$

Paranteza reprezintă tocmai pe $-\psi$ din formula (6.26) și deci

$$\sigma_{vL} = \sigma_{-1} - \psi \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_m.$$

Aplicînd relația (6.53), rezultă

$$c = \frac{\sigma_{-1} - \psi \cdot \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \sigma_m}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_v} \quad (6.54)$$

Se observă deosebirea esențială între formula lui Serensen (6.29) și formula (6.54), în care, în mod nefiresc, se aplică factorul $\beta_k/\varepsilon\gamma$ părții constante σ_m a ciclului asimetric.

Metoda descrisă are și o altă variantă, de asemenea practică, aceea în care trecerea de la ciclul real $M_1 M_2$ se face direct pe verticala σ_m , obținînd punctul L_1' din fig. 6.12. Procedînd pe aceeași cale, relația de definiție (6.53) duce la formula

$$c = \frac{\sigma_{-1} - \psi \sigma_m}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_v} \quad (6.55)$$

Această relație este folosită și în lucrarea [5], pentru calculul la oboseală al paletelor de compresoare, la care solicitarea variabilă poate crește datorită vibrațiilor de rezonanță, în timp ce solicitarea medie se menține constantă.

Pentru diagrama ciclurilor limită schematizată printr-o singură dreaptă, ca în fig. 6.6, criteriul de similitudine $\sigma_m = \text{const}$ duce la expresia coeficientului de siguranță

$$c = \frac{\sigma_{-1} - \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r} \sigma_m}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_v} \quad (6.56)$$

6.2.2.4. Comparație între metodele de calcul al coeficientului de siguranță

Din descrierea de mai înainte au rezultat o serie de formule pentru calculul coeficientului de siguranță. Dintre acestea, cea mai uzuală metodă din literatura sovietică este a lui Serensen, bazată pe criteriul de similitudine $R = \text{const}$: se va folosi formula (6.29) dacă punctul reprezentativ al ciclului se află deasupra liniei OB din fig. 6.7; pentru cicluri situate sub această linie, la metale tenace se va calcula coeficientul de siguranță față de limita de curgere, cu formula (6.21), iar la cele fragile se va aplica relația (6.31). Numai în cazurile cînd nu se cunoaște de loc rezistența la oboseală prin ciclu pulsator σ_0 se va aplica metoda Soderberg, folosind formulele (6.22)–(6.25). Evident, dacă din modul de funcționare a mașinii se cunoaște exact legea de trecere de la ciclul real la ciclul limită, este recomandabil a se face calculul în consecință prin metoda Kimelman sau alta.

6.2.2.5. Valori numerice pentru coeficienți de siguranță și rezistențe admisibile

Valorile numerice ale coeficienților de siguranță trebuie alese după: calitatea materialului, importanța piesei, precizia calculului etc. Se dau următoarele valori de orientare [75]:

— pentru piese din materiale puțin omogene (piese turnate), pentru piese mari: $c = 2,0 \dots 3,0$.

— pentru piese de omogenitate și tehnologie curentă: $c = 1,5 \dots 2,0$.

— pentru piese din materiale perfect omogene, lucrate cu tehnologie foarte îngrijită, se poate coborî pînă la $c = 1,3$; în cazuri excepționale, cînd toți factorii de calcul sînt perfect determinați, se poate merge chiar pînă la $c = 1,1$.

În ce privește rezistențele admisibile la solicitări variabile, se folosesc următoarele relații:

— Pentru ciclu simetric, formula (6.8)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{c \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma}} = (\sigma_a)_{III},$$

cu adaptări corespunzătoare pentru întindere-compresiune, încovoiere, răsucire.

— Pentru ciclu pulsator, în formula (6.38) se face $k=1$ și rezultă

$$\sigma_a = \frac{2\sigma_{-1}}{c \left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} + \psi \right)} = \frac{\sigma_0 (1 + \psi)}{c \left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} + \psi \right)} = (\sigma_a)_{II}, \quad (6.57)$$

Relații între rezistențele admisibile și proprietățile mecanice ale unor metale și aliaje

Materialul	Cazul de solicitare	Relații pentru determinarea rezistențelor admisibile			
		Întindere σ_{at}	Compresiune σ_{ac}	Încovoiere σ_{al}	Răsucire τ_a
Oțeluri	I	$0,5 \sigma_c$	$= \sigma_{at}$	$(1,1 \dots 1,2) \sigma_{at}$	$(0,6 \dots 0,65) \sigma_{at}$
	II	$(0,3 \dots 0,4) \sigma_c$	$= \sigma_{at}$	$= \sigma_{at}$	$(0,6 \dots 0,65) \sigma_{at}$
	III	$(0,4 \dots 0,5) \sigma_{-1}$	$= \sigma_{at}$	$= \sigma_{at}$	$(0,6 \dots 0,65) \sigma_{at}$
Oțel de arc	I	—	—	$(0,7 \dots 0,8) \sigma_c$	$0,8 \sigma_{at}$
	II	—	—	$0,4 \sigma_c$	$0,8 \sigma_{at}$
	III	—	—	$0,6 \sigma_{-1}$	$0,8 \sigma_{at}$
Fonte cenușii	I	$0,33 \sigma_r$	$2,5 \sigma_{at}$	$(1,4 \dots 1,7) \sigma_{at}^*)$	$1,2 \sigma_{at}^{**})$
	II	$0,25 \sigma_r$	$2,5 \sigma_{at}$	$(1,25 \dots 1,45) \sigma_{at}^*)$	$1,1 \sigma_{at}^{**})$
	III	$0,15 \sigma_r$	—	$(1,15 \dots 1,25) \sigma_{at}^*)$	$1,0 \sigma_{at}^{**})$

176

12 — Calculul de rezistență la solicitări variabile

Fonte maleabile	I	$(0,25 \dots 0,3) \sigma_r$	Albă $1,5 \sigma_{at}$ Neagră $2,0 \sigma_{at}$	$1,3 \sigma_{at}$	$1,2 \sigma_{at}$
	II	$0,2 \sigma_r$	Albă $1,5 \sigma_{at}$ Neagră $2,0 \sigma_{at}$	$1,2 \sigma_{at}$	$1,1 \sigma_{at}$
	III	$(0,1 \dots 0,15) \sigma_r$	—	$1,1 \sigma_{at}$	$1,0 \sigma_{at}$
Oțel turnat	I	$0,5 \sigma_c$ sau $(0,3 \dots 0,4) \sigma_r$	$1,1 \sigma_{at}$	$1,1 \sigma_{at}$	$(0,6 \dots 0,65) \sigma_r$
	II	$0,2 \sigma_r$	$1,1 \sigma_{at}$	$1,1 \sigma_{at}$	—
	III	$0,15 \sigma_r$	$1,1 \sigma_{at}$	$1,1 \sigma_{at}$	—
Cupru și aliaje de cupru	I	$(0,3 \dots 0,4) \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$= \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$
	II	$0,2 \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$= \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$
	III	$(0,1 \dots 0,15) \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$= \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$
Aliaje ușoare	I	$(0,2 \dots 0,3) \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$(1,1 \dots 1,2) \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$
	II	$0,2 \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$(1,1 \dots 1,2) \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$
	III	$(0,1 \dots 0,15) \sigma_r$	$= \sigma_{at}$	$(1,1 \dots 1,2) \sigma_{at}$	$0,7 \sigma_{at}$

*) Valorile minime pentru secțiunea I, mijlocii pentru secțiune dreptunghiulară și maxime pentru secțiune circulară.

**) Secțiune circulară.

de asemenea cu modificările necesare (σ_{-1t} , σ_{-1} , τ_{-1} , σ_{0t} , σ_0 , τ_0) pentru cele trei feluri de solicitări.

S-a notat $(\sigma_a)_{III}$, reprezentînd rezistența admisibilă în cazul III de solicitare din tabele clasice (ciclu simetric), respectiv $(\sigma_a)_{II}$ pentru ciclu pulsator.

În metoda germană [24], rezistența admisibilă prin ciclu pulsator se ia

$$\sigma_a = \frac{\sigma_0}{c \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma}} = (\sigma_a)_{II} \quad (6.58)$$

respectiv se adaugă, atît pentru ciclul simetric cît și pulsator, un *coeficient de șoc* φ

$$(\sigma_a)_{III} = \frac{\sigma_{-1}}{\varphi \cdot c \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma}}; \quad (\sigma_a)_{II} = \frac{\sigma_0}{\varphi \cdot c \frac{\beta_k}{\epsilon \gamma}}. \quad (6.59)$$

Dacă solicitarea variabilă nu are șocuri, se ia $\varphi = 1$.

Se observă că formulele (6.57) și (6.58) devin identice atunci cînd $\psi = 0$, ceea ce corespunde la o serie de oțeluri. În acest caz ($\psi = 0$), evident că și formulele care dau coeficientul de siguranță prin metoda Serensen (6.29) și prin metoda germană (6.55) sau (6.54) devin identice. De asemenea, dat fiind că atunci cînd nu este nul, ψ are valori foarte mici, rezultă că diferențele de calcul între metoda Serensen și metoda germană sînt relativ mici.

— Pentru ciclu asimetric oarecare, rezistența admisibilă se va determina din relația (6.38) sau altele similare.

— Pentru solicitări statice, la oțeluri se ia, în general,

$$\sigma_a = 0,5 \cdot \sigma_c = (\sigma_a)_I; \quad (6.60)$$

unde σ_c este limita de curgere, respectiv, la răsucire

$$\tau_a = (0,6 \dots 0,65) \sigma_a. \quad (6.61)$$

În lucrarea [81] se dă o sistematizare utilă a relațiilor dintre rezistențele admisibile ale metalelor, în cazurile de solicitare I (statică), II (pulsatoare), III (simetrică), în funcție de proprietățile mecanice ale lor. Pe baza acelor date s-a întocmit tabela 6.2; ce poate servi proiectanților. Se atrage atenția că acolo unde valorile rezistențelor admisibile sînt raportate la cele dintr-o coloană anterioară (de exemplu $\tau_a = 0,7 \sigma_{at}$) legătura este valabilă pe același rînd orizontal.

6.3. REGIMURI STAȚIONARE DE SOLICITĂRI COMPUSE

6.3.1. Stări limită de solicitări compuse

Calculul de rezistență la solicitări ciclice compuse trebuie să pornească, la fel ca la solicitările statice, de la teoriile asupra stărilor limită de solicitări variabile.

Se știe că, la solicitări statice, efortul unitar normal, echivalent unei stări de solicitare care produce eforturi unitare normale și tangențiale, are următoarele expresii:

— după teoria efortului unitar normal maxim

$$\sigma_e = 0,5\sigma + 0,5 \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}; \quad (I) \quad (6.62)$$

— după teoria deformației maxime

$$\sigma_e = 0,35\sigma + 0,65 \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}; \quad (II) \quad (6.63)$$

— după teoria efortului unitar tangențial maxim

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}; \quad (III) \quad (6.64)$$

— după teoria lui Mohr

$$\sigma_e = \frac{1-\nu}{2} \sigma + \frac{1+\nu}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}, \quad (6.65)$$

unde

$$\nu = \frac{\sigma_{ct}}{\sigma_{cc}}; \quad (6.66)$$

în care σ_{ct} este limita de curgere la întindere, iar σ_{cc} la compresiune;

— după teoria energiei de variație a formei

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (IV) \quad (6.67)$$

Dînd lui σ_e diferite valori caracteristice, se poate face dimensionarea piesei ($\sigma_e = \sigma_a$), se poate stabili apariția curgerii plastice ($\sigma_e = \sigma_c$) sau apariția rupei ($\sigma_e = \sigma_r$). Astfel, dacă se caută apariția curgerii plastice, relațiile notate cu I—IV duc la reprezentările grafice din fig. 6.13: coordonatele σ , τ ale unui punct al unei curbe reprezintă starea de solicitare compusă limită, care, după teoria respectivă, produce curgerea plastică.

Experiențele făcute la solicitări compuse prin cicluri simetrice, variînd în fază, au arătat că stările limită de solicitări compuse

care produc ruperea prin oboseală corespund teoriei de rupere a energiei de deformare, în cazul metalelor tenace, respectiv teoriei efortului unitar maxim, în cazul metalelor fragile (oțeluri aliate cu concentratori, fonte). Se ajunge astfel la reprezentarea stărilor limită prin relațiile (3.1), (3.2), respectiv prin diagramele arătate la 3.3.5.

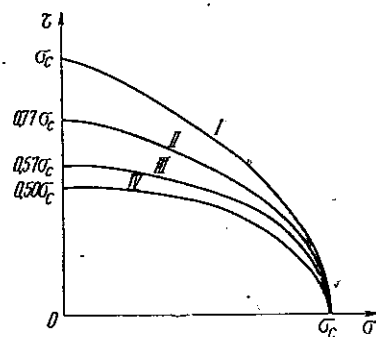


Fig. 6.13.

6.3.2. Coeficientul de siguranță al solicitării compuse

Se consideră o stare de solicitare compusă prin cicluri simetrice în fază, de încovoiere și răsucire, avînd diagrama stărilor limită de solicitări variabile ca în fig. 6.14. Orice punct de pe elipsa ciclurilor limită BLA reprezintă o stare de solicitare compusă, de amplitudină σ_{vL} , τ_{vL} , care dă în piesă un coeficient de siguranță $c=1$. Se construiește elipsa $A'MB'$, asemenea elipsei ciclurilor limită, avînd toate razele vectoriale reduse în raportul c (coeficientul de siguranță)

$$\frac{OA}{OA'} = \frac{OB}{OB'} = \frac{OL}{OM} = c.$$

Punctul M reprezintă starea de solicitare compusă reală din piesă (σ_v , τ_v), iar punctul L pe cea limită, similară ei. În baza relațiilor de similitudine, rezultă

$$\frac{OL}{OM} = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v} = \frac{\tau_{vL}}{\tau_v} = c, \quad (6.68)$$

unde c este coeficientul de siguranță al solicitării compuse.

Se scrie relația (3.1), adică ecuația elipsei ALB

$$\left(\frac{\sigma_{vL}}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{vL}}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1.$$

Pentru mai multă claritate, simbolurile σ_L , τ_L din formula (3.1) s-au înlocuit prin σ_{vL} , τ_{vL} . Împărțind primul termen cu σ_v^2 și al doilea cu τ_v^2 , rezultă

$$\frac{\left(\frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}\right)^2} + \frac{\left(\frac{\tau_{vL}}{\tau_v}\right)^2}{\left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_v}\right)^2} = 1.$$

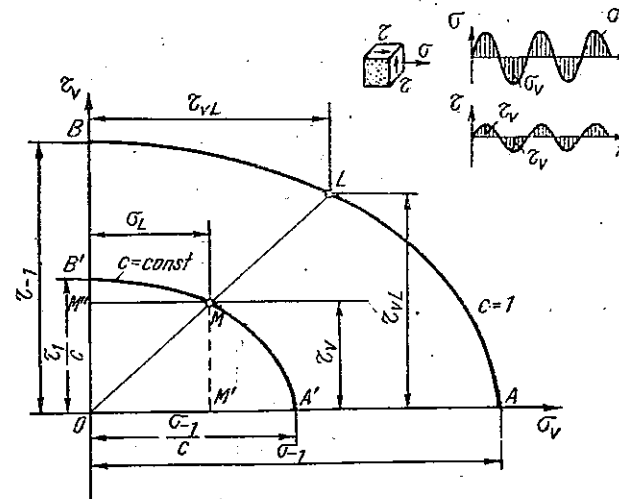


Fig. 6.14.

Conform definiției cunoscute, numitorii sînt tocmai coeficienții de siguranță ai solicitărilor simple componente

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}; \quad c_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_v} \quad (6.69)$$

pe cînd numărătorii au expresia (6.68), ceea ce dă

$$\frac{c^2}{c_\sigma^2} + \frac{c^2}{c_\tau^2} = 1$$

sau, rezolvînd în raport cu c :

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{c_\sigma^2} + \frac{1}{c_\tau^2}; \quad c = \frac{c_\sigma c_\tau}{\sqrt{c_\sigma^2 + c_\tau^2}}. \quad (6.70)$$

Metoda indicată se poate aplica și ciclurilor asimetrice, reducându-le la cicluri simetrice echivalente, cu relația (6.35), sau alta similară, și aplicând apoi formulele (6.69), (6.70). În esență deci, dacă trebuie să se țină seamă și de factorii β_k , ε , γ , se calculează coeficienții de siguranță c_σ , c_τ prin metodele descrise anterior și apoi se aplică relația (6.70).

La metale fragile, pornind de la condiția de rezistență (3.2) se găsește relația care dă coeficientul de siguranță al solicitării compuse

$$\left(\frac{c}{c_\sigma}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1\right) + \frac{c}{c_\sigma} \left(2 - \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right) + \left(\frac{c}{c_\tau}\right)^2 = 1. \quad (6.71)$$

Pentru $\sigma_{-1} = 2\tau_{-1}$, ceea ce corespunde teoriei III de rupere, relația (6.71) se transformă în (6.70).

Pentru o stare plană de eforturi unitare, dată prin eforturi unitare variabile σ_x , σ_y , τ_{xy} , în cazul când acestea variază după cicluri asimetrice, se face în prealabil reducerea lor la cicluri simetrice echivalente

$$\sigma_{xve}, \sigma_{yve}, \tau_{xyve}$$

cu relația de forma (6.35) sau cu relațiile lui Serensen [75]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xve} &= \sigma_{xv} + \psi \sigma_{xm} \\ \sigma_{yve} &= \sigma_{yv} + \psi \sigma_{ym} \\ \tau_{xyve} &= \tau_{xyv} + \psi \tau_{xym} \end{aligned} \right\} \quad (6.72)$$

și apoi se determină coeficientul de siguranță al solicitării compuse

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{(\sigma_{xve} - \sigma_{yve})^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \tau_{xyve}^2}}. \quad (6.73)$$

Analog, calculul coeficientului de siguranță al aceleiași solicitări, față de limita de curgere, este

$$c_c = \frac{\sigma_c}{\sqrt{(\sigma_{x \max} - \sigma_{y \max})^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\tau_c}\right)^2 \tau_{xy \max}^2}}, \quad (6.74)$$

în care

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x \max} &= \sigma_{xv} + \sigma_{xm}; \\ \sigma_{y \max} &= \sigma_{yv} + \sigma_{ym}; \\ \tau_{xy \max} &= \tau_{xyv} + \tau_{xym}. \end{aligned} \right\} \quad (6.75)$$

6.3.3. Eforturi unitare echivalente la diferite solicitări compuse

— Pentru solicitarea de încovoiere și răsucire prin cicluri simetrice, efortul unitar echivalent σ_{ve} , după teoria III sau IV de rupere, este

$$\sigma_{ve} = \sqrt{\sigma_v^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \tau_v^2}. \quad (6.76)$$

Cu această valoare se poate proceda apoi la calculul coeficientului de siguranță, ca pentru o solicitare simetrică de încovoiere.

În lucrarea [80] se aplică coeficienții β_k , ε , γ asupra componentelor σ_v , τ_v obținând

$$\sigma_{ve} = \sqrt{\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \cdot \sigma_v\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \tau_v\right)^2}. \quad (6.77)$$

Cu valoarea σ_{ve} se află coeficientul de siguranță al solicitării compuse, ca pentru o solicitare de încovoiere la o epruvetă netedă

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ve}}. \quad (6.78)$$

Se mai dă și expresia unui coeficient de concentrare echivalent al solicitării compuse

$$\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma}\right)_e = \sqrt{\left(\frac{\beta_{k\sigma}}{\varepsilon \gamma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \left(\frac{\tau_{k\tau}}{\sigma_v}\right)^2 \left(\frac{\beta_{k\tau}}{\varepsilon \gamma}\right)^2}, \quad (6.79)$$

căre se face apoi calculul la încovoiere, prin relația (6.5).

— Pentru combinații de solicitări statice și variabile, se poate face reducerea la o solicitare variabilă echivalentă, prin relația aproximativă

$$\sigma_{var e} = \sqrt{\sigma_{var}^2 + \left(\frac{\sigma_{a var}}{\tau_{ast}}\right)^2 \tau_{st}^2}, \quad (6.80)$$

unde:

- σ_{var} este efortul unitar maxim al solicitării variabile (σ_{max});
- $\sigma_{a var}$ — rezistența admisibilă la solicitarea variabilă;
- τ_{ast} — rezistența admisibilă la solicitarea statică;
- τ_{st} — efortul unitar static;
- $\sigma_{var e}$ — efortul unitar maxim al solicitării variabile echivalente.

De asemenea se poate reduce la o solicitare statică echivalentă

$$\sigma_{ste} = \sqrt{\sigma_{st}^2 + \left(\frac{\sigma_{ast}}{\tau_{avar}}\right)^2 \tau_{var}^2}, \quad (6.81)$$

notațiile fiind analoge celor anterioare.

Cu mărirea σ_{ste} se poate face calculul coeficientului de siguranță față de limita de curgere. Valoarea (6.80) poate fi comparată cu rezistența admisibilă determinată pentru ciclul asimetric al solicitării variabile.

— Pentru cicluri asimetrice de încovoiere și răsucire, se poate determina efortul unitar maxim echivalent de încovoiere

$$\sigma_{maxe} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \tau_{max}^2} \quad (6.82)$$

iar valoarea obținută se compară cu rezistența admisibilă a ciclului asimetric de încovoiere.

O metodă specială de calcul al coeficientului de siguranță la solicitări compuse este dată de Kimelman în lucrarea [14].

6.4. O NOUĂ METODĂ PENTRU CALCULUL COEFICIENTULUI DE SIGURANȚĂ LA SOLICITĂRI PRIN CICLURI ASIMETRICE

Concluziile metodei de calcul la solicitări compuse, reprezentată prin formula (6.70), duc la o analiză a solicitărilor prin cicluri simetrice și la propunerea unei noi metode de calcul.

În fig. 6.13 s-a arătat că stările limită de solicitări compuse statice, care produc curgerea plastică, pot fi reprezentate printr-o curbă de forma unei elipse. Analog, la solicitările variabile prin cicluri simetrice σ_v , τ_v (fig. 6.14), stările limită care produc ruperea prin oboseală sînt reprezentate prin punctele unui sfert de elipsă.

Solicitarea prin ciclu asimetric poate fi privită ca o solicitare compusă, rezultată din suprapunerea unei solicitări statice, de mărime σ_m și a unui ciclu simetric, de amplitudine σ_v . Stările limită extreme, pentru cele două feluri de solicitări (statică și simetrică) sînt date, în cazul metalelor tenace, de către limita de curgere σ_c și rezistența la oboseală σ_{-1} (punctele C și A din fig. 6.15). În continuare, se urmărește să se reprezinte diagrama ciclurilor limită prin sfertul de elipsă ALC, avînd ecuația

$$\left(\frac{\sigma_{mL}}{\sigma_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{vL}}{\sigma_{-1}}\right)^2 = 1. \quad (6.83)$$

Prin această reprezentare, rezistența la oboseală variază după o curbă continuă, așa cum este în realitate fenomenul fizic. Folosirea legii de variație după o elipsă este justificată de exemplele anterioare, referitoare la alte situații de solicitări compuse.

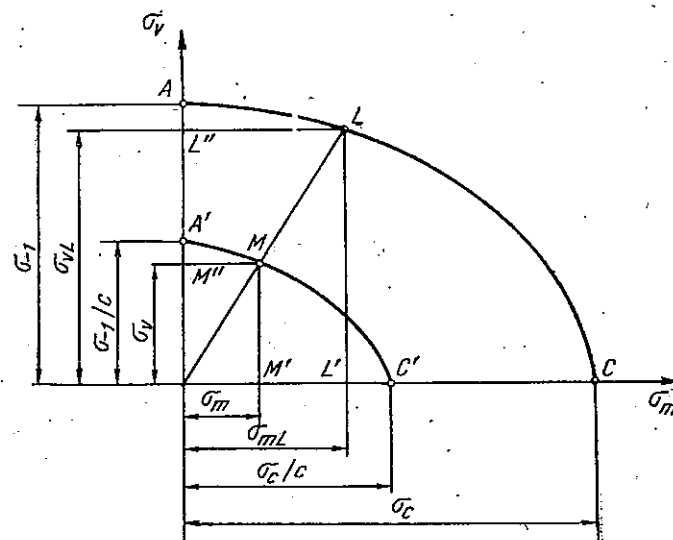


Fig. 6.15.

Literatura tehnică arată că, la solicitări statice, rezistența admisibilă se ia

$$\sigma_a \approx 0,5\sigma_c,$$

iar la cele variabile prin ciclu simetric

$$\sigma_a \approx 0,5\sigma_{-1}.$$

Cu alte cuvinte, la extremele curbei ALC există același coeficient de siguranță, $c=2$ (sau altă valoare). Această constatare ne îndreptățește a duce prin punctul M o elipsă A'MC', similară elipsei limită ALC, avînd toate razele vectoriale reduse în același raport c. Procedînd analog ca la demonstrarea formulei (6.70), se poate scrie

$$c = \frac{OC}{OC'} = \frac{OA}{OA'} = \frac{OL}{OM} = \frac{OL'}{OM'} = \frac{\sigma_{mL}}{\sigma_m} = \frac{OL''}{OM''} = \frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v}, \quad (6.84)$$

$$c_s = \frac{\sigma_c}{\sigma_m}; \quad c_v = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}, \quad (6.85)$$

unde s-au numit

c_s — coeficientul de siguranță al solicitării statice;

c_v — coeficientul de siguranță al solicitării variabile.

Ecuția (6.83) se poate transforma

$$\frac{\left(\frac{\sigma_{mL}}{\sigma_m}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_m}\right)^2} + \frac{\left(\frac{\sigma_{vL}}{\sigma_v}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v}\right)^2} = 1$$

și ținînd seamă de (6.84) și (6.85), rezultă

$$\frac{c^2}{c_s^2} + \frac{c^2}{c_v^2} = 1,$$

respectiv

$$c = \frac{c_s c_v}{\sqrt{c_s^2 + c_v^2}}. \quad (6.86)$$

S-a găsit astfel o nouă relație de calcul pentru coeficientul de siguranță la solicitări prin cicluri asimetrice. Dacă se substituie c_s , c_v prin expresiile (6.85), relația (6.86) devine

$$c = \frac{\sigma_c \sigma_{-1}}{\sqrt{\sigma_v^2 \sigma_c^2 + \sigma_m^2 \sigma_{-1}^2}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_m^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)^2}} \quad (6.87)$$

Atunci cînd trebuie ținut seamă și de factorii β_k , ε , γ , formula (6.87) devine

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma}\right)^2 \sigma_v^2 + \sigma_m^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}\right)^2}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{\beta_{kP}^2 \sigma_v^2 + \sigma_m^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}\right)^2}}. \quad (6.88)$$

Ea poate fi demonstrată pe aceeași cale ca mai înainte, dacă la fig. 6.15 se reduce σ_{-1} cu factorul $\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma}$, sau se amplifică σ_v cu același factor.

Metoda propusă elimină folosirea lui σ_0 , respectiv a lui ψ din formula lui Serensen. Este bine a se face o discuție în jurul lui σ_0 , respectiv o comparație cu metoda Serensen.

Dacă în ecuația (6.83) se face

$$\sigma_{mL} = \sigma_{vL} = \frac{\sigma_0}{2},$$

se găsește expresia rezistenței la oboseală prin ciclu pulsator

$$\sigma_0 = \frac{2\sigma_{-1}\sigma_c}{\sqrt{\sigma_{-1}^2 + \sigma_c^2}}. \quad (6.89)$$

După datele din tabelele anexe I, II, IV, s-a întocmit tabela 6.3, în care valorile σ_0' sînt cele din documentația existentă, iar σ_0'' sînt valorile medii obținute prin aplicarea formulei (6.89). Se vede că această formulă dă valori superioare lui σ_0' , cu 11—13% la oțeluri carbon, cu 3—7% la oțeluri carbon de calitate și foarte apropiate la cele aliate. Pe de altă parte, în lucrarea [75] se dau unele indicații asupra lui ψ , care duc la valori ale lui σ_0 mult superioare lui σ_0' , ca și lui σ_0'' din tabela 6.3. Așa, de exemplu, la oțeluri carbon se dă $\psi=0$, ceea ce duce la $\sigma_0=2\sigma_{-1}$. Rezultă de aici că în literatura tehnică există încă mari incertitudini asupra lui σ_0 , ca și asupra lui ψ , ceea ce îngreunează uneori aplicarea metodei Serensen.

Tabela 6.3

Valori comparative pentru σ_0

Materia lui	σ_c kgf/mm ²	σ_{-1} kgf/mm ²	σ_0' kgf/mm ²	σ_0'' kgf/mm ²	$\frac{\sigma_0' - \sigma_0''}{\sigma_0'} \cdot 100$ %
OL34	minimum 19	17	22	25,3	13
OL38	minimum 22	18,5	25	28,3	12
OL50	27	24	32	35,8	11
OL60	30	28	36	40,9	12
OL70	minimum 35	33	42	48,1	13
OLC25	minimum 24	19—24	30	32,2	7
OLC35	minimum 28	23—28	37	38,0	3
OLC45	minimum 34	28—32	43	45,0	4
OLC60	minimum 40	32—36	50	52,0	4
35CN15	minimum 52	36—42	63	62,6	-0,6
35CN25	minimum 56	38—46	68	67,5	-0,7
30CN35	minimum 67	42—50	82	76,0	-4

Metoda propusă, sintetizată prin relațiile (6.86)—(6.88), prezintă următoarele particularități:

— Folosește o curbă continuă a ciclurilor limită, determinată de mărimile σ_{-1} , σ_c , care încadrează destul de bine valorile cunoscute astăzi la unele materiale pentru σ_0 .

— Nu necesită cunoașterea mărimilor incerte σ_0 , ψ .

— Folosește o formulă unitară pentru întregul domeniu de existență al solicitării variabile $-1 \leq R \leq +1$.

— Prin felul cum s-a ales curba ciclurilor limită, ea se apropie de curba reală mai mult decât diagramele schematizate, ceea ce face ca coeficienții calculați să fie mai apropiați de cei reali.

Calculule făcute prin noua metodă arată că valorile coeficienților de siguranță sînt apropiate de cele date de metoda Serensen. În domeniul apropiat de solicitarea statică (σ_m mare și σ_v mic), faptul că elipsa ciclurilor limită trece puțin deasupra dreptei BD din fig. 6.7 face ca valorile coeficientului de siguranță calculat prin noua metodă să fie ușor superioare celor date de calculul static, făcut prin formula (6.21).

6.5. CALCULUL LA DURABILITATE

Uneori, anumite piese au de funcționat o durată limitată, inferioară numărului de cicluri care ar duce la atingerea rezistenței la oboseală, după care sînt scoase complet din serviciu. În acest caz, nu se mai calculează coeficientul de siguranță față de rezistența la oboseală, ci se face un *calcul de durabilitate*. Se consideră curba de oboseală ABC din fig. 6.16. Solicitarea reală din piesă, de valoare maximală σ_{max} , se aplică pe o durată de N

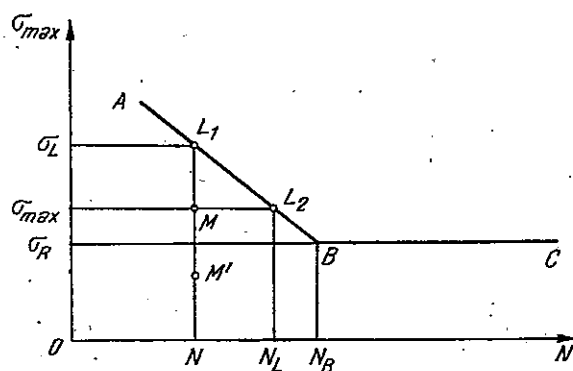


Fig. 6.16.

cicluri, fiind reprezentată în desen prin punctul M . Ducînd verticala ML_1 , se află punctul L_1 de pe linia AB , a cărei ordonată σ_L poartă numele de *rezistență de durată* sau *rezistență la oboseală limitată pentru N cicluri*. Se determină coeficientul de siguranță față de rezistența de durată (la N cicluri)

$$c_N = \frac{\sigma_L}{\sigma_{max}} \quad (6.90)$$

De asemenea, ducînd orizontala ML_2 , se află numărul de cicluri N_L după care piesa se rupe la efortul unitar σ_{max} . Se definește *coeficientul de siguranță la durabilitate*

$$c_d = \frac{N_L}{N} \quad (6.91)$$

Pentru cicluri de mărime $\sigma_{max} < \sigma_R$ (de exemplu M' din fig. 6.16) există numai coeficientul c_N .

Pentru calculul coeficienților c_N , c_d , curba de oboseală trebuie să fie construită chiar pentru piesa reală. Calculul la durabilitate și la rezistență limitată este îngreuiat de traseul incert al părții descendente a curbei de oboseală. Adeseori, pe această porțiune, dispersia mare a rezultatelor experimentale face ca linia AB din fig. 6.16 să fie înlocuită prin zona hașurată din fig. 6.17 (diagrama stabilită de Ujik, se referă la un oțel cu $\sigma_r = 51 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1} = 30 \text{ kgf/mm}^2$). Acest lucru are drept consecință o dispersie a valorilor date de formulele (6.90), (6.91).

Calculul de durabilitate, ținînd seamă de viața limitată a pieselor, este echivalent cu alegerea în proiectare a unor rezistențe admisibile mai mari, ceea ce conduce la economii de material. El se va aplica totdeauna cînd durata de funcționare a piesei, măsurată în cicluri, este inferioară limitei de determinare a rezistenței la oboseală ($N < N_B$). Calculul la durabilitate poate fi aplicat și la solicitări compuse, coeficienții dați de relațiile (6.90) sau (6.91), fiind introduși în formula (6.70).

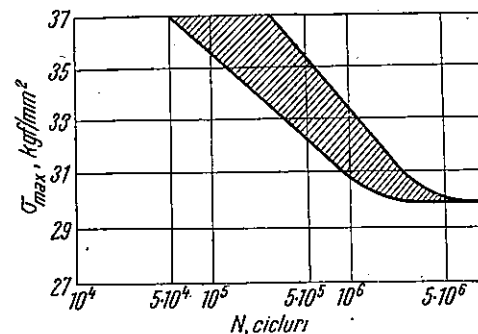


Fig. 6.17.

6.6. REGIMURI NESTAȚIONARE DE SOLICITĂRI VARIABILE

Rareori solicitările din piesele de mașini au loc după cicluri staționare. Modul de funcționare a mașinilor face ca amplitudinile ciclurilor să varieze uneori după legi cunoscute periodice sau neperiodice, alteori după legi ce nu pot fi cercetate decât pe bază

statistică. Punctul de plecare a calculului la regimuri nestaționare îl constituie tocmai studiul felului cum se modifică în timp ciclurile de solicitări. Problema va fi examinată în etape succesive.

6.6.1. Solicitări cu o singură treaptă de suprasolicitare

Primele cercetări asupra solicitărilor în regimuri nestaționare s-au făcut cu o singură treaptă de schimbare a amplitudinilor (se consideră că ne ocupăm de cicluri simetrice). În exemplul din fig. 6.18, cele două linii orizontale reprezintă pe σ_{max} , având treptele σ_I și σ_{II} ; n_I și n_{II} sînt numerele de cicluri în cadrul celor două trepte. În cazul fig. 6.18, *a* se aplică întâi cicluri de amplitudine σ_I , urmate de cicluri cu $\sigma_{II} > \sigma_I$, pînă are loc ruperea. În cazul fig. 6.18, *b* se începe cu σ_I , urmat de $\sigma_{II} < \sigma_I$, pînă la rupere. În ambele exemple, atît σ_I cît și σ_{II} sînt superioare rezistenței la oboseală σ_{-1} , deci piesele încercate se rup. Dacă la

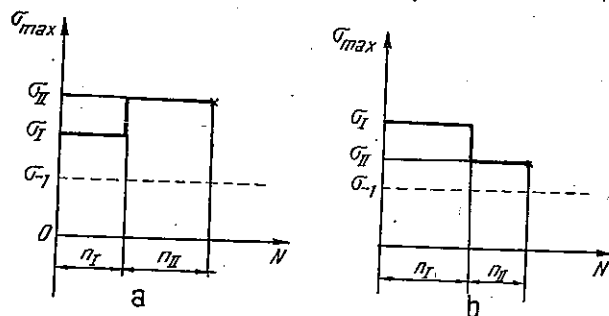


Fig. 6.18.

exemplul din fig. 6.18, *b* se ia $\sigma_{II} = \sigma_{-1}$, experimentarea duce la construirea curbei suprasolicitărilor nepericuloase (fig. 4.66). În studiul solicitărilor cu două trepte se pot întâlni următoarele cazuri:

— Ambele trepte ale solicitării sînt inferioare lui σ_{-1} . Dacă atît $\sigma_I < \sigma_{-1}$, cît și $\sigma_{II} < \sigma_{-1}$, atunci piesa nu se rupe. Coeficientul de siguranță se determină, pe calea uzuală, cu relația

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{v max}}, \quad (6.92)$$

în care $\sigma_{v max}$ este cea mai mare din amplitudinile σ_I , σ_{II} .

— O treaptă a solicitării este $\sigma_I > \sigma_{-1}$, cealaltă $\sigma_{II} < \sigma_{-1}$. Trebuie cercetat dacă suprasolicitarea σ_I este sau nu periculoasă. În cazul cînd σ_I se află sub curba suprasolicitărilor nepericuloase, deci are durată relativ mică, ea nu influențează calculul și se ia în considerare solicitarea de bază, deci coeficientul de siguranță este

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{II}}.$$

Cînd suprasolicitarea este periculoasă, ea micșorează rezistența la oboseală de la σ_{-1} pînă la $\sigma'_{-1} < \sigma_{-1}$, iar coeficientul de siguranță

$$c = \frac{\sigma'_{-1}}{\sigma_{II}}.$$

— Ambele trepte ale solicitării depășesc rezistența la oboseală. Se consideră din nou cazul din fig. 6.18, explicat prin fig. 6.19, unde $\sigma_I > \sigma_{-1}$, $\sigma_{II} > \sigma_{-1}$. Se încearcă epruveta, conform fig. 6.19, *c*, pe durata a n_I cicluri, cu

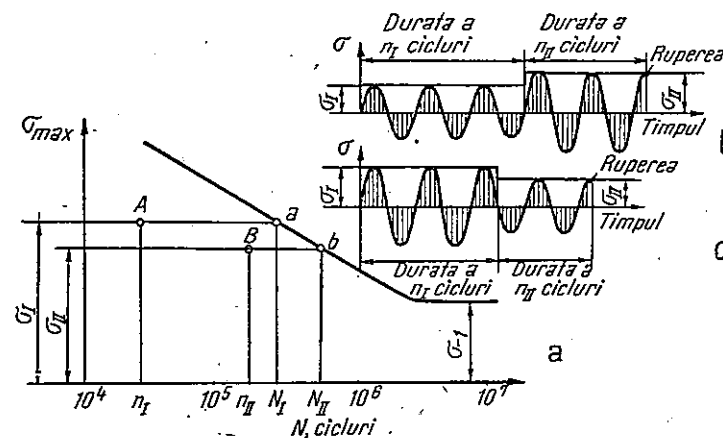


Fig. 6.19.

$\sigma_I > \sigma_{-1}$, corespunzător punctului A din fig. 6.19, *a*. Se vede că n_I este inferior numărului de cicluri N_I , care ar produce ruperea la efortul unitar σ_I (punctul *a*). După aceea, epruveta se încearcă în continuare, cu $\sigma_{II} < \sigma_I$, pe durata n_{II} , corespunzătoare punctului B, pînă se rupe. Dacă nu ar fi existat treapta anterioară σ_I , epruveta se rupea, la efortul unitar σ_{II} , după N_{II} cicluri (punc-

tu l b). Mărimile N_I , N_{II} se iau de pe curba de oboseală clasică, pe cînd n_I , n_{II} reprezintă duratele experimentărilor. Se definesc mărimile:

$$H = \frac{N_{II} - n_{II}}{N_{II}}, \quad (6.93)$$

numită variația durabilității, și

$$\delta = \frac{n_I}{N_I} \quad (6.94)$$

gradul de deteriorare al treptei I. În cazul experienței citate, pot exista variantele $\sigma_I > \sigma_{II}$ (fig. 6.19, c) și $\sigma_I < \sigma_{II}$ (fig. 6.19, b). Experiențele arată că epruvetele care au suferit în prealabil o suprasolicitare — adică $\sigma_I > \sigma_{II}$ — se rup mai repede decît cele care au suferit o subsolicitare — $\sigma_I < \sigma_{II}$ — chiar dacă mărimile σ_I , σ_{II} , n_I , n_{II} sînt aceleași. În fig. 6.20 se dă, după experiențele lui Baharev, relația între H și δ , pentru un oțel avînd $\sigma_r = 31,5 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_c = 22,1 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1} = 21 \text{ kgf/mm}^2$. Curba 1 se referă la $\sigma_I = 23 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{II} = 34 \text{ kgf/mm}^2$, $N_I = 0,64 \cdot 10^6$, $N_{II} = 0,068 \cdot 10^6$. Curba 2 este pentru $\sigma_I = 30 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{II} = 34 \text{ kgf/mm}^2$,

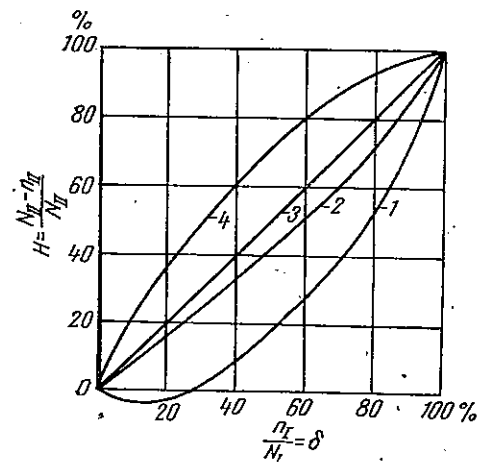


Fig. 6.20.

$N_I = 0,15 \cdot 10^6$, $N_{II} = 0,068 \cdot 10^6$. Curba 3 este pentru $\sigma_I = \sigma_{II}$ (linie dreaptă). Curba 4 se referă la $\sigma_I = 34 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{II} = 23 \text{ kgf/mm}^2$, $N_I = 0,068 \cdot 10^6$, $N_{II} = 0,64 \cdot 10^6$. Valorile σ_I , σ_{II} superioare lui σ_r se explică pe de o parte prin faptul că ele se referă la încovoiere, cît și prin aceea că ele s-au calculat cu relația clasică $\sigma = \frac{M}{W}$, care, în domeniul deformațiilor plastice, dă erori. Examinînd aceste curbe, se vede că variația durabilității diferă în cazul $\sigma_I >$

σ_{II} față de $\sigma_I < \sigma_{II}$. La curba 1 avînd loc o subsolicitare, are loc la început întărirea materialului ($H < 0$). De notat că aici subsolicitarea este înțeleasă ca raport între σ_I și σ_{II} , nu față de σ_{-1} .

La oțeluri aliate de mare rezistență, această întărire, adică trecerea curbei sub axa orizontală, este mult accentuată. În lucrările [14], [57] se găsesc date mai complete asupra problemei.

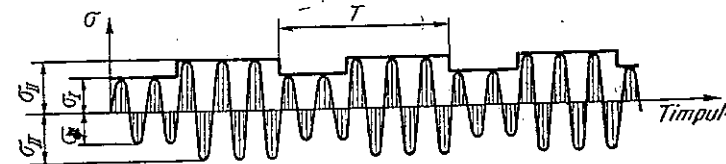


Fig. 6.21.

În cazul cînd cele două trepte de solicitare se repetă periodic, înainte de a produce ruperea piesei, are loc o *solicitare nestăționară periodică* (fig. 6.21).

Dacă numărul de perioade este relativ mare — cel puțin 30—40 — ordinea de succesiune a lor este indiferentă.

6.6.2. Solicitări variabile în trepte

Pentru trepte multiple de solicitare, repetate periodic de un număr mare de ori, ordinea de succesiune este indiferentă. De aceea, două moduri de aplicare a aceleiași trepte de solicitări (cu amplitudini σ_I și durate n_I egale) din fig. 6.22 sînt, din punctul de vedere al ruperii, identice.

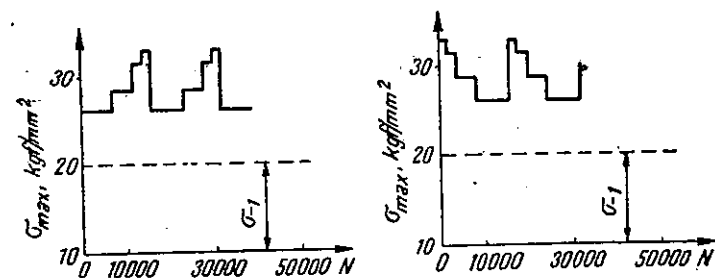


Fig. 6.22.

Pentru studiul solicitărilor în trepte, se pornește de la *diagrama de funcționare a mașinii* (fig. 6.23, a) care arată variația sarcinii acesteia în timp, respectiv variația amplitudinii σ_{max} a ciclurilor de solicitări variabile din piesa studiată. Forma acestor diagrame, de importanță capitală în studiul de față, depinde de natura mașinii, de condițiile de exploatare ale ei. La mașini cu

funcționare regulată, diagrama are aspecte destul de cunoscute. La vehicule (avioane, autovehicule, vagoane) aspectul ei este foarte neregulat. Astfel de diagrame pot fi ridicate, în cursul exploatării mașinii, cu ajutorul tensometriei electrice. Din diagrama din fig. 6.23, *a* se construiește diagrama din fig. 6.23, *b* care arată,

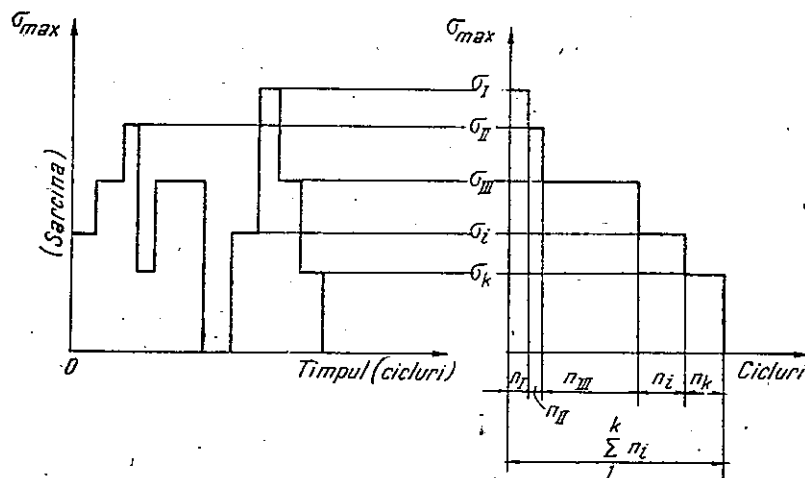


Fig. 6.23.

în mod etajat, numărul de cicluri n_i pe durata căruia se aplică fiecare treaptă de solicitare σ_i . Acestei diagrame i se dă, în literatura sovietică, numele de *spectrul amplitudinilor* [75]. În literatura germană, această diagramă poartă numele de *diagramă însumată* (Summenkurve).

Experiențele făcute asupra solicitărilor variabile multiple au arătat că suma deteriorărilor produse de diferitele trepte este o constantă

$$\frac{n_I}{N_I} + \frac{n_{II}}{N_{II}} + \frac{n_{III}}{N_{III}} + \dots = \sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = a. \quad (6.95)$$

În majoritatea experiențelor s-a găsit că această constantă este practic egală cu unitatea

$$\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (6.96)$$

Legea dată de relația (6.96), atribuită lui Palmgren și Miner, este numită în limba engleză „cumulative damage” (în limba

rusă накопление повреждений, în germană Schadensakkumulation). În relația (6.96) s-au notat:

- n_i — numărul de cicluri de aplicare a efortului unitar variabil de amplitudine σ_i ;
- N_i — numărul de cicluri după care efortul unitar de amplitudine σ_i cauzează ruperea;
- k — numărul de trepte ale solicitării.

Curba lui Wöhler are aspectul unei hiperbole, a cărei ecuație se poate scrie [57], [75]

$$\sigma^m \cdot N = \sigma_{-1}^m N_B = \text{const}, \quad (6.97)$$

unde σ , N reprezintă coordonatele unui punct oarecare de pe partea descendentă a curbei (fig. 2.1), iar σ_{-1} , N_B coordonatele punctului în care curba devine orizontală. În ce privește valorile constantelor m și N_B se dau următoarele indicații:

- la epruvete mici, lustruite, netede $m=9 \dots 12$, $N_B=(1 \dots 4) \cdot 10^6$;
- la epruvete mici cu concentratori $m=6 \dots 10$, $N_B=(1 \dots 4) \cdot 10^6$;
- la piese presate $m=6 \dots 10$, $N_B=(6 \dots 10) \cdot 10^6$.

Ca valori uzuale, medii, pentru oțel se pot lua în calcul: $m=9$, $N_B=5 \cdot 10^6$.

În baza relațiilor (6.96) și (6.97) se poate stabili amplitudinea unui ciclu simetric staționar, echivalent solicitării nestaționare

$$\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{1}{N_B} \cdot \sum_1^k \sigma_i^m n_i}, \quad (6.98)$$

ceea ce duce la expresia coeficientului de siguranță

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_e} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt[m]{\frac{1}{N_B} \cdot \sum_1^k \sigma_i^m n_i}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt[m]{\frac{N_t}{N_B} \cdot \sum_1^k \sigma_i^m \frac{n_i}{N_t}}}, \quad (6.99)$$

unde s-a notat prin N_t numărul total de cicluri al solicitării nestaționare. În cazul cînd relația (6.96) trebuie înlocuită cu (6.95), numărătorul formulei (6.99) se înmulțește cu $\sqrt[m]{a}$.

Dacă epruveta pe care s-a determinat σ_{-1} este diferită de cea care se calculează, se introduc coeficienții β_k , ε , γ și relația (6.99) devine

$$c = \frac{\frac{\varepsilon \gamma}{\beta_k} \cdot \sigma_{-1}}{\sqrt[m]{\frac{N_t}{N_B} \cdot \sum_1^k \sigma_i^m \frac{n_i}{N_t}}}. \quad (6.100)$$

Metoda descrisă reprezintă un calcul la durabilitate — fiind bazată pe relația (6.95), analogă cu (6.91), deci se aplică atunci când efortul unitar maxim al solicitării în trepte este superior lui σ_{-1} .

6.6.3. Solicitări cu variație continuă a amplitudinii

În cazul când diagrama de funcționare a mașinii (fig. 6.23, a) nu prezintă salturi distincte, ci variație continuă, atunci și diagrama din fig. 6.23, b se transformă într-o curbă continuă, ca în fig. 6.24: amplitudinile ciclurilor scad continuu, de la σ_A până

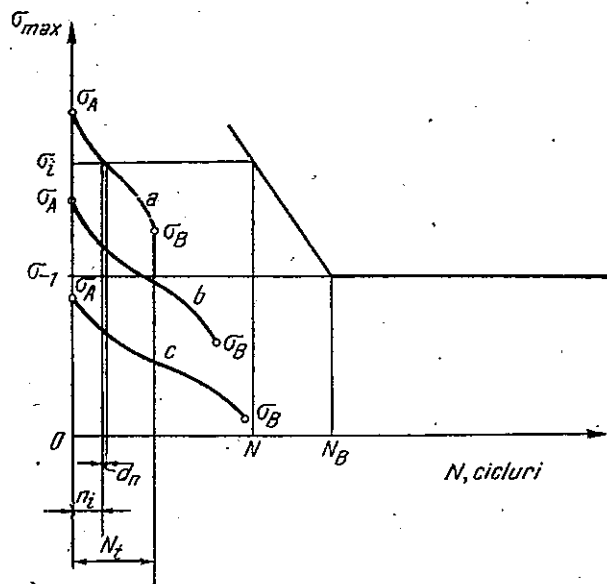


Fig. 6.24.

la σ_B . În acest caz, o amplitudine oarecare σ_i a solicitării nestacionare acționează asupra piesei numai pe un interval infinit mic de cicluri dn .

Relația de însumare a deteriorărilor (6.95), sau (6.96) se transformă în

$$\int \frac{dn}{N} = a; \text{ sau } \int \frac{dn}{N} = 1. \quad (6.101)$$

Se construiește apoi curba de frecvență a amplitudinilor (fig. 6.25), care arată pe ce fracțiuni din durata totală a func-

ționării există în piesă o anumită amplitudine σ_{max} . Astfel, dacă, pe durata de funcționare N_t amplitudinea variază între σ_A și σ_B , ca în fig. 6.24, înseamnă că amplitudinea minimă σ_B este atinsă tot timpul, deci are frecvența 1, pe când amplitudinea maximă σ_A este atinsă pe o durată foarte joasă, având frecvența apropiată de zero. Prin urmare, frecvența amplitudinii σ_i (fig. 6.24) poate fi definită prin relația

$$\Phi = \frac{n_i}{N_t}. \quad (6.102)$$

Mai utilă decât curba de frecvență este *curba de răspîndire a amplitudinilor* (curba lui Gauss), avînd forma din fig. 6.26. În exemplul din fig. 6.26, amplitudinea mijlocie $\sigma_v = 1050 \text{ kgf/cm}^2$ are cea mai mare răspîndire. Se stabilește ecuația $\Phi'(\sigma_v)$ a acestei curbe, care face ca relația (6.101) să se transforme în

$$\int_{\sigma_A}^{\sigma_B} \frac{N_t}{N} \cdot \Phi'(\sigma_v) d\sigma_v = a. \quad (6.103)$$

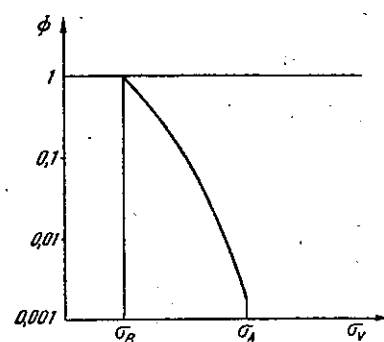


Fig. 6.25.

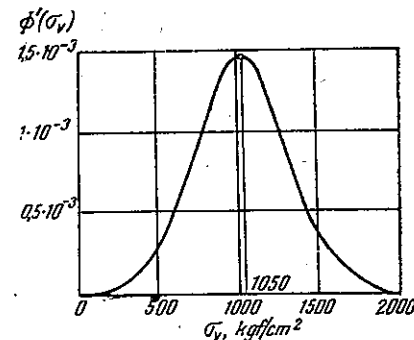


Fig. 6.26.

În general, mărimea a este cuprinsă între limitele 1 și 1,3.

Se procedează analog ca la solicitarea în trepte și se găsește expresia coeficientului de siguranță [75]

$$c = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt[m]{\frac{N_t}{N_B} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} \sigma_v^m \cdot \Phi'(\sigma_v) d\sigma_v}}, \quad (6.104)$$

aplicabilă cazului a, din fig. 6.24, când $\sigma_A > \sigma_{-1}$.

Pentru cazul *b*, din fig. 6.24, cînd $\sigma_A > \sigma_{-1}$ și $\sigma_B < \sigma_{-1}$, se schimbă limitele integralei $\int_{\sigma_{-1}}^{\sigma_B}$, unde σ_{-1} reprezintă rezistența la oboseală, micșorată datorită deteriorării.

În cazul *c*, din fig. 6.24, dacă $\sigma_A < \sigma_{-1}$, nu mai are loc deteriorarea.

În mod analog, dacă în relația (6.103) $a \neq 1$, atunci în formula (6.104), σ_{-1} se înmulțește cu $\sqrt[m]{a}$. O aplicație numerică a metodei expuse se găsește în lucrarea [75].

Date interesante asupra solicitărilor prin cicluri nestaționare se găsesc în lucrările prof. D. N. Reșelov, făcute în legătură cu calculul pieselor de mașini-unelte.

Cercetările asupra materialelor folosite în construcții de avioane se fac reproducînd, după program, modul real de solicitare în timpul funcționării. Numeroase date asupra acestei probleme se găsesc în lucrările [15], [87]. În lucrarea [73] se face un studiu statistic interesant asupra solicitărilor prin cicluri nestaționare, care au loc în piesele de autocamion, la diferite regiuri de funcționare.

Exemplul 6.1. Să se facă verificarea coeficientului de siguranță al arborelui principal al trolui de corhănit al unui tractor, avînd forma și dimensiunile din fig. 6.27. Regimul de lucru al trolui este următorul:

- durata totală de funcționare: 2 ani;
- timp de lucru anual: 6 luni, cîte 8 ore pe zi;
- numărul de corhănituri pe oră: 15;
- sarcina necesară pentru corhănit: 10 tf;

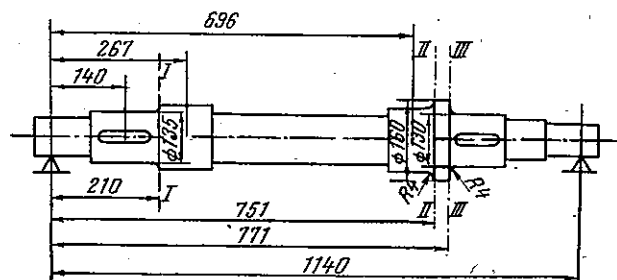


Fig. 6.27.

- durata corhănitului unui buștean: 15 s;
- turația arborelui: $n=42$ rot/min;
- în timpul celor 15 s de lucru, 20% din timp acționează sarcina de 10 tf, 35% o sarcină de 5 tf și 45% din timp o sarcină de 3 tf. Regimul de lucru este reprezentat în fig. 6.28.

Arborele este din oțel, avînd $\sigma_r=70$ kgf/mm², $\sigma_c=40$ kgf/mm², $\sigma_{-1}=32,5$ kgf/mm², $\tau_{-1}=22,5$ kgf/mm².

Eforturile unitare de încovoiere variază în arbore după un ciclu simetric, iar cele de răsucire sînt constante. În tabela 6.4 s-au dat valorile momentelor de încovoiere și răsucire și ale eforturilor unitare σ_v , τ_m , fără a mai indica mersul calculului, precum și coeficienții de concentrare, în cele trei secțiuni marcate pe fig. 6.27.

Se calculează numărul total de bușteni la care va lucra trolul

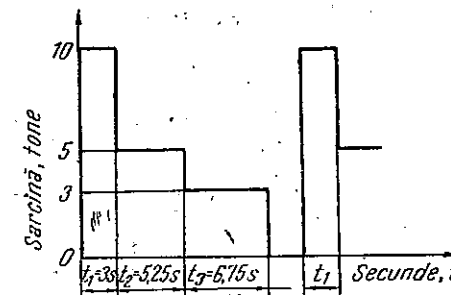


Fig. 6.28.

$$N_b = 2 \text{ ani} \times 6 \frac{\text{luni}}{\text{an}} \times 25 \frac{\text{zile}}{\text{lună}} \times 8 \frac{\text{ore}}{\text{zi}} \times 15 \frac{\text{bușteni}}{\text{oră}} = 36 \text{ 000 bușteni.}$$

Pe de altă parte, trolul face 42 rot/min, sau $\frac{42}{4} = 10,5$ rotații în 15 s, deci 10,5 cicluri la un buștean. Numărul total de cicluri de lucru

$$N_t = 36 \text{ 000} \cdot 10,5 = 378 \text{ 000 cicluri.}$$

Intrucît solicitarea de răsucire este constantă și de valoare mică, se va determina coeficientul de siguranță numai pe baza celei de încovoiere. (În caz contrar, se puteau determina doi coeficienți de siguranță, c_σ , c_τ și aplica formula de calcul pentru solicitări compuse, sau se reduceau solicitările σ și τ la solicitări echivalente, pe baza unei teorii de rupere).

Tabela 6.4

Solicitări în arborele din fig. 6.27, la regimul de lucru din fig. 6.28

Secțiunea	M_i kgfcm	M_f kgfcm	$\sigma_v = \sigma_{max}$ kgf/cm ²	τ_m kgf/cm ²	β_k ey
I—I	256 000	143 250	1 040	152	3,1
II—II	260 000	143 250	870	120	3,3
III—III	246 000	143 250	1 120	166	3,5

Pentru secțiunea I—I, cele trei trepte ale solicitării au amplitudinile

$$\sigma_1 = \sigma_{v1} = 1\,040 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 0,5\sigma_1 = 520 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_3 = 0,3\sigma_1 = 312 \text{ kgf/cm}^2.$$

Duratele de aplicare ale celor trei trepte sînt

$$\frac{n_1}{N_t} = 0,2; \quad \frac{n_2}{N_t} = 0,35; \quad \frac{n_3}{N_t} = 0,45.$$

Alegînd constantele $m=9$, $N_B = 10^7$ și aplicînd formula (6.100) în secțiunea I—I, rezultă

$$c_I = \frac{\frac{1}{3,1} \times 3\,250}{\sqrt[9]{\frac{0,378 \times 10^6}{10^7} (1\,040^9 \times 0,2 + 520^9 \times 0,35 + 312^9 \times 0,45)}} = 1,71.$$

În mod analog, în celelalte două secțiuni se găsesc

$$c_{II} = 1,94; \quad c_{III} = 1,42.$$

Valorile coeficienților de siguranță sînt acceptabile; deci piesa poate fi considerată corespunzătoare.

Capitolul 7

APLICAREA CALCULULUI LA SOLICITĂRI VARIABILE LA DIFERITE PIESE DE MAȘINI

În acest capitol se vor da o serie de exemple numerice de aplicare a calculului la solicitări variabile. În anumite cazuri, se vor face și unele completări teoretice.

7.1. ARBORI, OSII, BOLȚURI

7.1.1. Solicitări la încovoiere

Exemplul 7.1. Să se determine rezistența admisibilă a unui arbore, solicitat la încovoiere, prin ciclu asimetric avînd $k = \frac{\sigma_v}{\sigma_m} = 2$, dacă piesa are $\beta_{kp} = 1,5$, iar materialul este oțel cu $\sigma_c = 50 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1} = 33 \text{ kgf/mm}^2$, $\psi = 0,25$. Se ia coeficientul de siguranță $c = 2$.

Rezolvare. Se aplică formula (6.38)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{c} \cdot \frac{1+k}{k \cdot \beta_{kp} + \psi} = \frac{33}{2} \cdot \frac{1+2}{2 \cdot 1,5 + 0,25} = 15,2 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}.$$

Exemplul 7.2. Bolțul pistonului unui motor are forma și dimensiunile din fig. 7.1, a, iar rezemarea și aplicarea sarcinii se face ca în fig. 7.1, b.

Diagrama de momente încovoietoare este reprezentată în fig. 7.1, c. Forța transmisă de la piston la bolț variază după un ciclu alternant, între $P_{max} = 5\,200 \text{ kgf}$ și $P_{min} = -1\,150 \text{ kgf}$. Materialul este un oțel aliat, cu $\sigma_r = 100 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_c = 75 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1} = 45 \text{ kgf/mm}^2$ și $\psi = 0,28$. Se cere coeficientul de siguranță.

Rezolvare. Modulul de rezistență la încovoiere

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) = \frac{\pi \cdot 3,17^3}{32} \left(1 - \frac{1,87^4}{3,17^4}\right) = 2,75 \text{ cm}^3.$$

Cu schema de forțe concentrate din fig. 7.1, b, momentul maxim

$$M = \frac{P}{2} \left[\left(\frac{3,09}{2} + 0,2 + \frac{5,08}{2} \right) - \frac{5,08}{4} \right] = 1,51P.$$

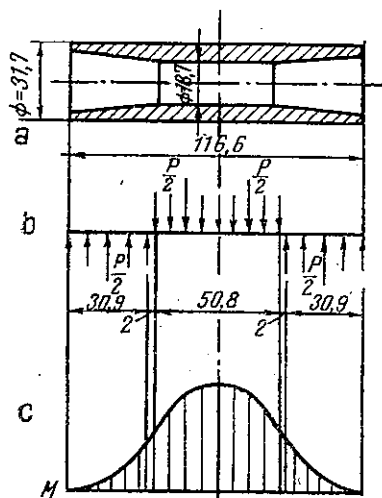


Fig. 7.1.

Nu există concentratori, deci $\beta_k = 1$. Bolțul este șlefuit și are $\gamma = 1$. După fig. 4.42, curba 2, se găsește $\varepsilon = 0,77$. Rezultă

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} = \frac{1}{0,77} = 1,3.$$

Ciclul are coeficient de asimetrie negativ, deci i se poate aplica formula lui Serensén (6.29)

$$c = \frac{45}{1,3 \times 17,47 + 0,28 \times 11,13} = 1,74.$$

Dacă se aplică metoda reprezentată de formula (6.88), atunci rezultă

$$c = \frac{45}{\sqrt{1,3^2 \times 17,47^2 + 11,13^2 \cdot \left(\frac{45}{75} \right)^2}} = 1,90.$$

Exemplul 7.3. Să se verifice axul rolei de echilibrare a cablului de la pisică unui pod rulant cu sarcină de 10 tf, avînd forma

din fig. 7.2 [24]. Se dau: $l = 140$ mm, $d = 60$ mm. Materialul este OL 38. Avînd în vedere importanța piesei, sarcina se mărește, în calcul, cu 50%.

Rezolvare. Momentul încovoiator maxim, în mijlocul axului, este

$$M = 2S \frac{l}{8} = 2 \times 2500 \times \frac{14}{8} \approx 8750 \text{ kgfcm}.$$

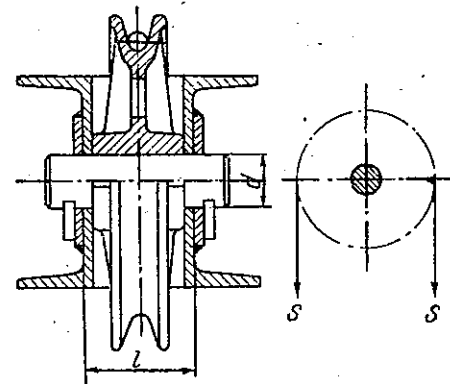


Fig. 7.2.

Valoarea de calcul se ia

$$M' = 1,5 \times 8750 \approx 13100 \text{ kgfcm}.$$

Solicitarea este prin ciclu pulsator, avînd

$$\sigma_{max} = \frac{13100}{\frac{\pi \times 6^3}{32}} = 620 \text{ kgf/cm}^2,$$

respectiv

$$\sigma_v = \sigma_m = 3,1 \text{ kgf/mm}^2.$$

Conform anexe I, oțelul are $\sigma_{-1} = 18,5 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_0 = 25 \text{ kgf/mm}^2$. Se calculează

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{2 \times 18,5 - 25}{25} = 0,48.$$

Conform fig. 4.42, curba 1, rezultă $\varepsilon = 0,79$. Axul fiind strunjit fin, conform curbei 3 din fig. 4.49, rezultă $\gamma = 0,95$. Piesa nu are concentratori, deci $\beta_k = 1$. Rezultă

$$\beta_{kP} = \frac{1}{0,79 \times 0,95} = 1,33.$$

Aplicând formula lui Serensen (6.29), se găsește,

$$c = \frac{18,5}{1,33 \times 3,1 + 0,48 \times 3,1} = 3,3.$$

Piesa are un coeficient de siguranță foarte mare.

Exemplul 7.4. Să se verifice osia unei pisici de macara avînd forma din fig. 7.3, cînd se dau: $P=1500$ kgf, $D=250$ mm, $d=60$ mm, $\lambda=100$ mm, $L=90$ mm. Materialul este OL 50. Solicitarea este de încovoiere simetrică [24].

Rezolvare. Momentul încovoiitor maxim are loc în drăp-tul roții (fig. 7.3), iar valoarea sa este

$$M = Pc = P \frac{L + \lambda}{2} = 1500 \frac{9 + 10}{2} \approx 14300 \text{ kgfcm}.$$

Ciclul simetric are

$$\sigma_v = \frac{M}{W} = \frac{14300}{\frac{\pi \times 6^3}{32}} = 675 \text{ kgf/cm}^2.$$

Roata fiind fixată pe ax cu o singură pană se consideră în cazul montajelor presate, ai căror coeficienți de concentrare se dau în fig. 4.26. Corespunzător diametrului d se găsește pe curba 1, $\frac{\beta_k}{\epsilon} = 3,1$, potrivit tocmai cu materialul piesei. Osia este rectificată, fără alt tratament, deci are, conform fig. 4.49, $\gamma = 0,95$. Materialul are, după tabela 1: $\sigma_{-1} = 24$ kgf/mm². Aplicînd formula (6.5), rezultă

$$c = \frac{24}{\frac{3,1}{0,95} \cdot 6,75} = 1,15.$$

Coeficientul de siguranță este mic, deci este util a înlocui materialul prin altul, avînd calități superioare.

Exemplul 7.5. Pe un arbore cu variație de diametru, de forma din fig. 4.4, avînd $D=55$ mm și $d=45$ mm, făcut din oțel cu

$\sigma_r = 52,5$ kgf/mm² și $\sigma_{-1} = 22,5$ kgf/mm² și solicitat prin ciclu simetric de încovoiere, urmează a se monta un rulment, ca în fig. 5.31. Inelul rulmentului are raza de racordare $r=2$ mm, ceea ce cere ca arborele să aibă o rază mai mică, de exemplu $r=1$ mm. În cazul cînd această racordare este periculoasă, se va folosi un inel intermediar, ca în fig. 5.25, ceea ce permite a se face arborele cu raza mare, de exemplu $r=8$ mm. Momentul încovoiitor are valoarea maximă $M=10300$ kgfcm. Se cere să se determine coefi-cientul de siguranță, în ambele alternative.

Rezolvare. Efortul unitar nominal în arbore este

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{10300}{\frac{\pi \cdot 4,5^3}{32}} = 1150 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_v = 11,5 \text{ kgf/mm}^2; \quad \sigma_m = 0.$$

Pentru prima rază de racordare, $r=1$ mm, se determină coefi-cientul de concentrare. Pentru $\frac{r}{d} = \frac{1}{45} = 0,02$, pe curba de jos a fig. 4.4 se găsește $\beta_{k0} = 2,7$. Intrucît acest coeficient este determi-nat pentru $d=30 \dots 50$ mm, înseamnă că $\epsilon=1$. Diagrama se re-feră la $\frac{D}{d} = 2$, iar piesa studiată are $\frac{D}{d} = \frac{55}{45} = 1,22$. Se aplică for-mula (4.8) în care, după fig. 4.11, $\xi = 0,85$:

$$\beta_k = 1 + 0,85(2,7 - 1) = 2,45.$$

Arborele este bine rectificat și se ia $\gamma=1$.

Cu relația (6.5) se află coeficientul de siguranță

$$c = \frac{22,5}{2,45 \cdot 11,5} = 0,8.$$

Coeficientul fiind subunitar, piesa se va rupe prin oboseală.

Pentru a doua variantă, repetînd succesiunea de calcule, re-zultă $\frac{D}{d} = 0,178$, $\beta_{k0} = 1,35$, $\xi = 0,85$, $\beta_k = 1,3$

$$c = \frac{22,5}{1,3 \times 11,5} = 1,5.$$

A doua construcție este deci corespunzătoare.

Exemplul 7.6. Un arbore drept, solicitat la încovoiere, este făcut din OL 60, avînd $\sigma_r = 65$ kgf/mm², $\sigma_c = 30$ kgf/mm², $\sigma_0 = 36$ kgf/mm², $\sigma_{-1} = 28$ kgf/mm². Arborele are diametrul $D=40$ mm și este stră-bătut, în secțiunea periculoasă (cea cu moment maxim) de o gaură, de diametru $d=8$ mm. Suprafața piesei este strunjită și

nu a fost supusă nici unui tratament. Piesa lucrează în aer. Asupra arborelui se aplică un ciclu asimetric, în care momentul încovoietor variază între $M_{max}=7\,500\text{ kgfcm}$ și $M_{min}=4\,500\text{ kgfcm}$. În cazul când valorile momentului încovoietor ar fi depășite, momentul M_{max} crește de două ori mai repede decât M_{min} , adică la o valoare a momentului minim $(1+a)M_{min}$ corespunde $(1+2a)M_{max}$. Se cere să se facă verificarea arborelui, prin diferitele metode studiate la cap. 6.

Rezolvare. Se calculează efortul unitar nominal. Modulul de rezistență al secțiunii slăbite este

$$W = \frac{\pi D^3}{32} - \frac{dD^2}{6} = \frac{\pi \times 4^3}{32} - \frac{0,8 \times 4^2}{6} = 4,15\text{ cm}^3.$$

Eforturile unitare sînt:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{7\,500}{4,15} = 1\,810\text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_{min} = \frac{M_{min}}{W} = \frac{4\,500}{4,15} = 1\,090\text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_m = \frac{18,1 + 10,9}{2} = 14,5\text{ kgf/mm}^2;$$

$$\sigma_v = \frac{18,1 - 10,9}{2} = 3,6\text{ kgf/mm}^2;$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{10,9}{18,1} = 0,603.$$

Coeficientul de concentrare se găsește pe fig. 4.18, curba 2, pentru $\frac{d}{D} = \frac{8}{40} = 0,2$, de valoare $\beta_k = 1,8$, corespunzător la $\sigma_r = 65\text{ kgf/mm}^2$.

Factorul dimensional, pentru $D=40\text{ mm}$, se ia din fig. 4.43, curba 2, avînd valoarea $\varepsilon=0,8$. Coeficientul de calitate, după fig. 4.49, curba 3, este $\gamma=0,9$. Coeficientul de concentrare complex este

$$\beta_{kp} = \frac{\beta_k}{\varepsilon\gamma} = \frac{1,8}{0,8 \times 0,9} = 2,5.$$

— Aplicînd metoda Soderberg, formula (6.23), rezultă

$$c = \frac{1}{2,5 \frac{3,6}{28} + \frac{14,5}{30}} = 1,25.$$

— Coeficientul de asimetrie fiind superior lui zero, nu se aplică metoda Serensen, ci se calculează coeficientul de siguranță față de limita de curgere, cu formula (6.21)

$$c = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{30}{18,1} = 1,66.$$

— Prin metoda germană, cu relația (6.54) rezultă

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{2 \times 28 - 36}{36} = 0,555;$$

$$c = \frac{28 - 0,555 \times 2,5 \times 14,5}{2,5 \times 3,6} = 0,89.$$

respectiv cu relația (6.55)

$$c = \frac{28 - 0,555 \times 14,5}{2,5 \times 3,6} = 2,22.$$

— Prin metoda nouă, dată de formula (6.88), rezultă

$$c = \frac{28}{\sqrt{2,5^2 \times 3,6^2 + 14,5^2 \left(\frac{28}{30}\right)^2}} = 1,72.$$

Coeficientul de siguranță calculat prin ultima metodă este numai cu 3% superior celui dat de limita de curgere, respectiv inferior celui dat de formula (6.55). Se observă că metoda Soderberg dă un coeficient prea mic, în timp ce formula (6.54) arată că piesa s-ar rupe. Rezultatul absurd dat de formula (6.54) se datorește: 1) folosirii criteriilor combinate $R=\text{const}$ și $\sigma_m=\text{const}$ la determinarea formulei; 2) valorii foarte ridicate a lui ψ , rezultînd din datele indicate de anexa I, în totală opoziție cu lucrarea [75], care pentru acest fel de oțeluri dă $\psi=0,05$ (de 10 ori mai mic).

— Față de indicațiile din enunțul problemei, este recomandabil a se aplica metoda Kîmelman. În acest scop, în prealabil trebuie desenată diagrama ciclurilor limită. Dacă se aplică coeficientul β_{kp} , atunci rezistența la oboseală, prin ciclu simetric, a piesei este

$$\sigma_{-1P} = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kp}} = \frac{28}{2,5} = 11,2\text{ kgf/mm}^2.$$

Dacă s-ar aplica aceeași relație lui σ_0 , spre a afla pe σ_{0P} , s-ar găsi o valoare sub linia AC din fig. 7.4. Aceasta se datorește valo-

rilor prea mici pentru σ_0 , date de anexa I. Ca urmare, se face diagrama schematizată printr-o singură dreaptă, ca în fig. 7.4.

Se întocmește apoi tabela 7.1, spre a afla modul de trecere de la ciclul real M , la ciclul limită L . Se observă că punctul 1

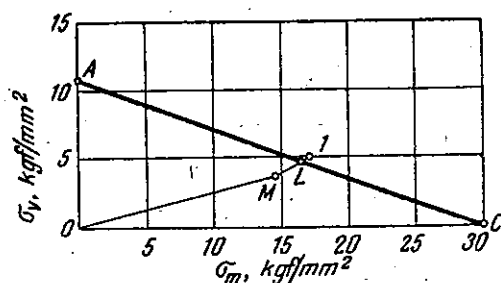


Fig. 7.4.

trece deasupra liniei AC; deci ciclul limită L este dat de intersecția liniei $M1$ cu linia AC . Făcând o interpolare, se găsește că lui L îi corespunde $M_L = 8\,800$ kgfcm. Conform relației (6.17), coeficientul de siguranță

$$c = \frac{M_L}{M_{max}} = \frac{8\,800}{7\,500} = 1,17.$$

Tabela 7.1

α	M_{max} kgfcm	M_{min} kgfcm	σ_{max} kgf/mm ²	σ_{min} kgf/mm ²	σ_0 kgf/mm ²	σ_m kgf/mm ²	Punctul de pe fig. 7.4
0	7 500	4 500	18,1	10,9	3,6	14,5	M
0,1	9 000	4 950	21,7	11,9	4,9	16,8	1

Valoarea este apropiată de cea dată de metoda Soderberg, deoarece s-a folosit aceeași diagramă schematizată, iar faptul că în fig. 7.4 punctul M este aproape de linia AC , face ca ciclul L să nu difere mult de cel care s-ar fi obținut prin prelungirea liniei OM ($R = \text{const}$).

7.1.2. Solicitări la răsucire

Exemplul 7.7. Un arbore, avînd forma din fig. 4.10, este solicitat la răsucire printr-un ciclu oscilant, la care se cunoaște coeficientul de asimetrie $R=0,5$. Dimensiunile arborelui sînt:

$D=75$ mm, $d=60$ mm, $r=5$ mm, iar materialul are $\sigma_r = 83$ kgf/mm², $\tau_c = 38$ kgf/mm², $\tau_{-1} = 21$ kgf/mm². Se dă $\gamma=1$. Luînd coeficientul de siguranță $c=2$, se cere să se determine momentul de răsucire capabil M_{tmax} .

Rezolvare. Se determină coeficientul de concentrare, pe baza fig. 4.10. După curba de jos, pentru $\frac{r}{d} = \frac{5}{60} = 0,08$ se află $\beta_{k0} = 1,3$, iar după curba de sus, $\beta_{k0} = 1,4$. Cum materialul se intercalează la mijloc, între cele două curbe, se ia $\beta_{k0} = 1,35$.

Pentru raportul $\frac{D}{d} = \frac{75}{60} = 1,25$, după fig. 4.11 rezultă $\xi = 0,8$, iar prin aplicarea formulei (4.8)

$$\beta_k = 1 + 0,8(1,35 - 1) = 1,28.$$

Se calculează coeficientul de concentrare al piesei cu relația (4.17), în care, după fig. 4.43, curbele 2 și 3:

$$(\beta_k)_{d_1} = 1,28, d_1 = 40 \text{ mm}, d = 60 \text{ mm},$$

$$(\epsilon_k)_{d_1} = 0,65; (\epsilon_k)_d = 0,55; (\epsilon)_d = 0,8$$

$$\beta_{kP} = 1,28 \frac{0,65}{0,55 \times 0,8} = 1,9.$$

Se determină coeficientul k , cu formula (6.37)

$$k = \frac{1 - 0,5}{1 + 0,5} = 0,33.$$

Neavînd date asupra lui ψ , se determină τ_a cu formula similară cu (6.39)

$$\tau_a = \frac{\tau_{-1}}{c} \cdot \frac{1+k}{k \cdot \beta_{kP} + \frac{\tau_{-1}}{\tau_c}} = \frac{21}{2} \cdot \frac{1+0,33}{0,33 \times 1,9 + \frac{21}{38}} = 10,9 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}.$$

Momentul maxim capabil

$$M_{tmax} = \tau_a W_p = 1\,090 \frac{\pi \times 6^3}{16} = 46\,200 \text{ kgfcm}.$$

Exemplul 7.8. Un arbore de forma din fig. 4.10, avînd dimensiunile $D=50$ mm, $d=40$ mm, $r=3$ mm, este făcut dintr-un oțel cu $\sigma_r = 80$ kgf/mm², $\tau_r = 40$ kgf/mm², $\tau_c = 26$ kgf/mm², $\tau_{-1} = 19$ kgf/mm². Arborele este solicitat printr-un ciclu pulsator de răsucire, cu $M_{tmax} = 7\,000$ kgfcm. Se cere coeficientul de siguranță.

Rezolvare. Se determină efortul unitar nominal

$$\tau_{max} = \frac{M_{t \max}}{W_p} = \frac{7.000}{\frac{\pi \times 4^3}{16}} = 558 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_m = \tau_v \approx 2,8 \text{ kgf/mm}^2.$$

Se determină coeficientul de concentrare cu ajutorul fig. 4.10.

După curba de jos, pentru $\frac{r}{d} = \frac{3}{40} = 0,075$, rezultă $\beta_{k0} = 1,3$, iar după cea de sus, $\beta_{k0} = 1,4$. Materialul fiind situat între cele două curbe, se ia $\beta_{k0} = 1,35$. Pentru $\frac{D}{d} = \frac{50}{40} = 1,25$, după fig. 4.11, rezultă $\xi = 0,8$; deci

$$\beta_k = 1 + 0,8(1,35 - 1) = 1,28.$$

Se vede că diametrul d se potrivește cu datele de experimentare ale fig. 4.10; deci $\varepsilon = 1$. În lipsă de alte indicații, se ia $\gamma = 1$; deci rezultă $\beta_{kp} = 1,28$.

Neavînd indicații asupra lui τ_0 , sau ψ , se determină coeficientul de siguranță prin formula (6.88)

$$c = \frac{\tau_{-1}}{\sqrt{\beta_{kp}^2 \tau_v^2 + \tau_m^2 \left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_c} \right)^2}} = \frac{19}{\sqrt{1,28^2 \times 2,8^2 + 2,8^2 \left(\frac{19}{26} \right)^2}} = 5,5.$$

Dacă se aplică metoda Soderberg, atunci rezultă

$$c = \frac{1}{\beta_{kp} \frac{\tau_v}{\tau_{-1}} + \frac{\tau_m}{\tau_c}} = 3,36.$$

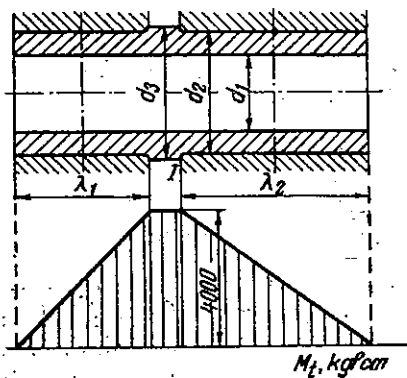


Fig. 7.5:

Cele două valori sînt mari, ceea ce înseamnă că, la nevoie, s-ar putea micșora raza de racordare r .

Exemplul 7.9. Un arbore dintr-o cutie de viteze are forma din fig. 7.5, pe cele două porțiuni λ_1, λ_2 fiind montate presat două roți dințate. Dimensiunile sînt: $d_1 = 80 \text{ mm}$,

$d_2 = 100 \text{ mm}$, $d_3 = 110 \text{ mm}$. Materialul este oțel 35 CN 25 (anexa IV) avînd: $\sigma_r = 90 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_c = 30 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_{-1} = 23 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_0 = 36 \text{ kgf/mm}^2$.

Locurile de calare au fost perfect șlefuite; deci $\gamma = 1$. Arborele transmite un moment de răsucire pulsator, de valoare $M_{t \max} = 40.000 \text{ kgfcm}$. Se cere coeficientul de siguranță al piesei.

Rezolvare. Modulul de rezistență polar al secțiunii

$$W_p = \frac{\pi (10^4 - 8^4)}{16 \times 10} = 116 \text{ cm}^3.$$

Eforturile unitare nominale sînt

$$\tau_{max} = \frac{M_{t \max}}{W_p} = \frac{40.000}{116} = 345 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\tau_v = \tau_m = 1,72 \text{ kgf/mm}^2.$$

Coeficientul de concentrare, inclusiv factorul dimensional, se determină după fig. 4.26—4.28. Din fig. 4.26, curba 1, pentru $d = 100 \text{ mm}$, se află $\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon} \right)_0 = 3,4$. Nefiind indicații asupra presiunii de fretaj, se ia $\xi'' = 1$. Pentru $\sigma_r = 90 \text{ kgf/mm}^2$, după fig. 4.27, rezultă $\xi' = 1,6$. Formula (4.9) dă

$$\frac{\beta_k}{\varepsilon} = 3,4 \times 1,6 = 5,44 = \beta_{kp}.$$

Din datele problemei, rezultă $\psi = 0,28$.

Aplicînd formula lui Serensen. (6.29), rezultă

$$c = \frac{\tau_{-1}}{\beta_{kp} \tau_v + \psi \tau_m} = \frac{23}{1,72(5,44 + 0,28)} = 2,33.$$

Cu metoda dată de formula (6.88) se obține

$$c = \frac{\tau_{-1}}{\sqrt{\beta_{kp}^2 \tau_v^2 + \tau_m^2 \left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_c} \right)^2}} = \frac{23}{1,72 \sqrt{5,44^2 + \left(\frac{23}{30} \right)^2}} = 2,42.$$

Cele două rezultate diferă între ele numai cu 4%. Fiind vorba de un ciclu pulsator, se calculează și coeficientul de siguranță față de limita de curgere

$$c_c = \frac{\tau_c}{\tau_{max}} = \frac{30}{3,45} = 8,7.$$

Piesa este corect dimensionată.

Exemplul 7.10. Să se găsească rezistența la oboseală, prin ciclu simetric, a unui arbore de forma din fig. 4.10, dacă se dau $D=110$ mm, $d=80$ mm, $r=12$ mm, iar materialul este oțel cu $\sigma_r=120$ kgf/mm² și $\tau_{-1}=30$ kgf/mm².

Rezolvare. Cu ajutorul fig. 4.10, se află, de pe curba de sus, $\beta_{k0}=1,25$, corespunzător la $\frac{r}{d}=\frac{12}{80}=0,15$. Din fig. 4.11, pentru $\frac{D}{d}=\frac{110}{80}=1,38$, rezultă $\xi=0,90$. Cu relația (4.8) se află

$$\beta_k = 1 + 0,90 (1,25 - 1) = 1,225.$$

Diagrama din fig. 4.10 se referă la $d_1=30 \dots 50$ mm, în medie $d_1=40$ mm, pe cînd piesa are $d=80$ mm. Se aplică relația (4.17), luînd coeficienții ϵ de pe curbele 2 și 3 ale fig. 4.43: $(\beta_k)_{d_1}=1,225$; $(\epsilon_k)_{d_1}=0,65$; $(\epsilon_k)_d=0,5$; $(\epsilon)_{d_1}=0,8$

$$\beta_{kP} = 1,225 \frac{0,65}{0,5 \times 0,8} \approx 2.$$

Rezistența la oboseală a arborelui este

$$\tau_{-1P} = \frac{\tau_{-1}}{\beta_{kP}} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ kgf/cm}^2.$$

7.1.3. Solicitări compuse

Exemplul 7.11. Un arbore de oțel, avînd forma din fig. 4.10, este solicitat la întindere printr-o forță constantă, care produce un efort unitar $\sigma=5$ kgf/mm² și la răsucire, printr-un cuplu oscilant, care produce eforturile unitare $\tau_{max}=5$ kgf/mm² și $\tau_{min}=2,5$ kgf/mm². Materialul are $\sigma_c=28$ kgf/mm², $\tau_c=16,4$ kgf/mm², $\tau_{-1}=11$ kgf/mm². În baza dimensiunilor și prelucrării, s-a stabilit coeficientul de concentrare complex, pentru răsucire, $\beta_{kP}=1,7$. Se cere coeficientul de siguranță al arborelui.

Rezolvare. Pentru solicitarea de întindere.

$$c_\sigma = \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{28}{5} = 5,6.$$

Pentru solicitarea de răsucire, dacă se ia în considerare metoda Serensen, ciclul se află între ciclul pulsator și solicitarea statică; deci se calculează coeficientul de siguranță față de limita de curgere:

$$c_\tau = \frac{\tau_c}{\tau_{max}} = \frac{16,4}{5} = 3,3.$$

Cu ajutorul formulei (6.70) se află

$$c = \frac{5,6 \times 3,3}{\sqrt{5,6^2 + 3,3^2}} = 2,84.$$

Dacă se calculează c_τ cu formula (6.88).

$$c_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\sqrt{\beta_{kP} \tau_v^2 + \tau_m^2 \left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_c} \right)^2}} = \frac{11}{\sqrt{1,7^2 \times 1,25^2 + 3,75^2 \left(\frac{11}{16,4} \right)^2}} = 3,35$$

$$\tau_m = \frac{5+2,5}{2} = 3,75 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}; \quad \tau_v = \frac{5-2,5}{2} = 1,25 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2},$$

atunci se găsește

$$c = \frac{5,6 \times 3,35}{\sqrt{5,6^2 + 3,35^2}} = 2,88,$$

adică, practic aceeași valoare.

Exemplul 7.12. Fusul din fig. 7.6 susține o roată dințată, care îi transmite forța de apăsare a dinților $P=1800$ kgf și momentul de răsucire $M_t=8100$ kgfcm. Materialul este oțel crom-molibden

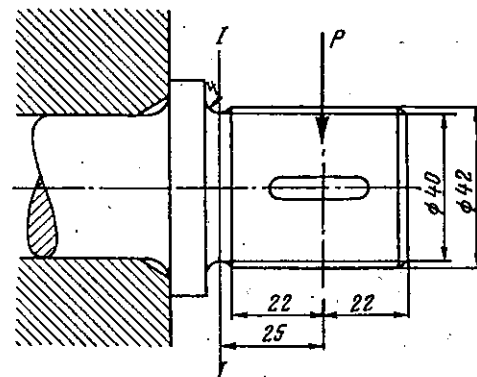


Fig. 7.6.

25 MoC 11 (anexa IV), avînd $\sigma_r=80$ kgf/mm², $\sigma_c=45$ kgf/mm², $\sigma_{-1}=36$ kgf/mm², $\tau_c=35$ kgf/mm², $\tau_{-1}=28$ kgf/mm². Racordarea, cu raza $r=4$ mm, este ecruiată prin rulare. Se cere coeficientul de siguranță [80].

Rezolvare. În secțiunea periculoasă I—I, momentul încovoietor

$$M_t = 1\,800 \times 2,5 = 4\,500 \text{ kgfcm}$$

iar efortul unitar nominal maxim

$$\sigma_{\max} = \frac{M_t}{W} = \frac{4\,500}{\frac{\pi \times 4^3}{32}} = 720 \text{ kgf/cm}^2.$$

Solicitarea de încovoiere este simetrică; deci

$$\sigma_v = \sigma_{\max} = 7,2 \text{ kgf/mm}^2, \quad \sigma_m = 0.$$

În ce privește solicitarea de răsucire, poate fi luată practic constantă (statică):

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} = \frac{8\,100}{\frac{\pi \times 4^3}{16}} = 645 \text{ kgf/cm}^2.$$

Se determină coeficientul de concentrare pentru solicitarea de încovoiere, pe baza fig. 4.12, cu $t=1 \text{ mm}$, $r=4 \text{ mm}$, $\frac{r}{d} = \frac{4}{40} = 0,1$. După curba de jos, rezultă $\beta_{k0}=1,65$, iar după cea de sus $\beta_{k0}=1,8$. Prin interpolare, pentru materialul piesei, se află $\beta_{k0}=1,75$.

Cum piesa are $\frac{t}{r} = \frac{1}{4} = 0,25$, în baza fig. 4.12 se află $\xi=0,8$, iar formula (4.8) dă

$$\beta_k = 1 + 0,8(1,75 - 1) = 1,6.$$

Pentru tratamentul de rulare, în baza celor arătate la cap. 5, la piese cu concentratori se poate lua $\gamma=1,6 \dots 1,8$. Alegînd valoarea minimă, rezultă

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{s\gamma} = \frac{1,6}{1 \times 1,6} = 1.$$

Pentru solicitarea de răsucire, coeficientul de siguranță

$$c_\tau = \frac{\tau_c}{\tau} = \frac{35}{6,45} = 5,42.$$

Pentru solicitarea de încovoiere

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP} \cdot \sigma_v} = \frac{36}{7,2} = 5,00.$$

Coeficientul de siguranță al solicitării compuse, dat de formula (6.70), este

$$c = \frac{5 \times 5,42}{\sqrt{5^2 + 5,42^2}} = 3,65.$$

Valoarea obținută este acoperitoare. În cazul cînd solicitarea de răsucire este variabilă, coeficientul de siguranță se reduce.

Exemplul 7.13. Arborele unei mașini are forma și dimensiunile din fig. 7.7, fiind încărcat cu forțele de pe desen. Între partea centrală, unde se aplică roata G , și partea din dreapta, unde este

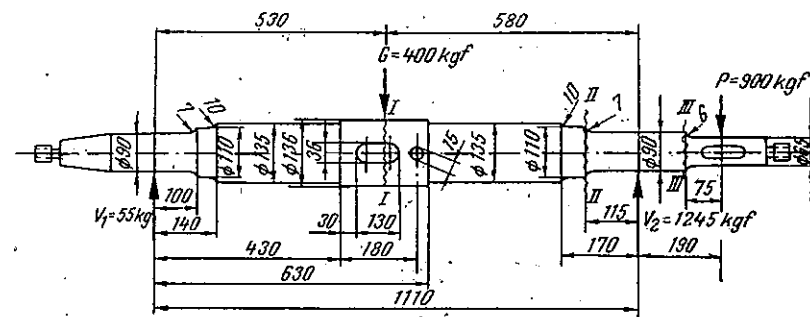


Fig. 7.7.

roata P , se transmite momentul de răsucire. Atît solicitarea de răsucire, cît și cea de încovoiere au loc prin ciclu simetric. Momentul de răsucire are valoarea $M_t = 12\,600 \text{ kgfcm}$. Materialul arborelui este OL 50, avînd $\sigma_{-1} = 24 \text{ kgf/mm}^2$ și $\tau_{-1} = 14 \text{ kgf/mm}^2$. Se cere să se facă verificarea la oboseală [80].

Rezolvare. Întrucît momentul de răsucire se transmite numai pe jumătatea din dreapta a arborelui, se consideră secțiuni periculoase I, II, III. Momentele încovoietoare în cele trei secțiuni sînt:

$$M_{tI} = 55 \times 53 = 2\,915 \text{ kgfcm};$$

$$M_{tII} = 900(19 + 11,5) - 1\,245 \times 11,5 = 13\,100 \text{ kgfcm};$$

$$M_{tIII} = 900 \times 7,5 = 6\,750 \text{ kgfcm},$$

Modulele de rezistență ale celor trei secțiuni sînt :

$$W_I = \frac{\pi \times 13,6^3}{32} = 247 \text{ cm}^3; \quad W_{pI} = 494 \text{ cm}^3;$$

$$W_{II} = \frac{\pi \times 9^3}{32} = 71,6 \text{ cm}^3; \quad W_{pII} = 143,2 \text{ cm}^3;$$

$$W_{III} = \frac{\pi \times 6,5^3}{32} = 27 \text{ cm}^3; \quad W_{pIII} = 54 \text{ cm}^3.$$

Amplitudinile eforturilor unitare în cele trei secțiuni sînt :

$$\sigma_{vI} = \sigma_{\max I} = \frac{2915}{247} = 12 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{vII} = \sigma_{\max II} = \frac{13100}{71,6} = 183 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\sigma_{vIII} = \sigma_{\max III} = \frac{6750}{27} = 250 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{vI} = \tau_{\max I} = \frac{12600}{494} \approx 26 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{vII} = \tau_{\max II} = \frac{12600}{143,2} = 88 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{vIII} = \tau_{\max III} = \frac{12600}{54} = 234 \text{ kgf/cm}^2.$$

Se determină coeficienții de concentrare în cele trei secțiuni.

În secțiunea I, pentru montajul presat, conform fig. 4.26, se găsește, la $d=136 \text{ mm}$, pe curba I: $\frac{\beta_{k\sigma}}{\epsilon} = 3,5$. Graficul se potrivește cu calitatea materialului, iar asupra presiunii nu sînt indicații; deci se lasă cifra neschimbată. Pentru răsucire, cu relația (4.10) se află

$$\frac{\beta_{k\tau}}{\epsilon} = 1 + 0,6(3,5 - 1) = 2,5.$$

În apropierea concentratorului dat de montajul presat, există și o gaură transversală, care mărește pericolul de rupere. Se determină și coeficientul de concentrare corespunzător acestui concentrator. Astfel, după curba $\sigma_r=53$ din fig. 4.19, la $\frac{d}{D} = \frac{15}{136} = 0,11$, se găsește $\beta_{k\sigma} = 1,5$. Pentru răsucire, pe baza fig. 4.20, linia I, rezultă $\beta_{k\tau} = 1,7$.

Pentru siguranță, se ia produsul coeficienților dați de cei doi concentratori

$$\frac{\beta_{k\sigma}}{\epsilon} = 3,5 \times 1,5 = 5,25; \quad \frac{\beta_{k\tau}}{\epsilon} = 2,5 \times 1,7 = 4,25.$$

În secțiunea II se folosește fig. 4.4, curba de jos, care dă $\beta_{k\sigma} = 1,7$ corespunzător lui $\frac{r}{d} = \frac{7}{90} \approx 0,08$. Pentru raportul $\frac{D}{d} = \frac{110}{90} = 1,22$, de pe curba I din fig. 4.11, se ia $\xi = 0,85$, iar formula (4.8) dă

$$\beta_k = 1 + 0,85(1,7 - 1) = 1,6.$$

Pe de altă parte, pentru a ține seamă de dimensiuni, se aplică formula (4.18), cu $(\epsilon)d$, luat din fig. 4.42, curba I:

$$\frac{\beta_{k\sigma}}{\epsilon} = \frac{1,6}{0,72} = 2,22.$$

Pentru răsucire se urmează aceeași cale, folosind fig. 4.10:

$$\beta_{k\sigma} = 1,3; \quad \xi = 0,76; \quad \beta_k = 1,23; \quad \frac{\beta_{k\tau}}{\epsilon} = \frac{1,23}{0,72} = 1,70.$$

În mod cu totul analog, pentru secțiunea III se găsește

$$\frac{\beta_{k\sigma}}{\epsilon} = 2,04; \quad \frac{\beta_{k\tau}}{\epsilon} = 1,62.$$

Arborele este rectificat, așa că, în baza fig. 4.49, se ia, pentru toate secțiunile, $\gamma = 0,95$.

Se procedează la verificarea celor trei secțiuni, aplicînd formulele (6.5) și (6.70).

În secțiunea I

$$c_\sigma = \frac{24}{\frac{5,25}{0,95} \cdot 0,12} = 35,5; \quad c_\tau = \frac{14}{\frac{4,25}{0,95} \cdot 0,26} = 12,0;$$

$$c_I = \frac{35,5 \times 12,0}{\sqrt{35,5^2 + 12,0^2}} = 11,4.$$

În secțiunea II

$$c_\sigma = \frac{24}{\frac{2,22}{0,95} \cdot 1,83} = 5,6; \quad c_\tau = \frac{14}{\frac{1,70}{0,95} \cdot 0,88} = 8,9;$$

$$c_{II} = \frac{5,6 \times 8,9}{\sqrt{5,6^2 + 8,9^2}} = 4,7.$$

În secțiunea III

$$c_\sigma = \frac{24}{\frac{2,04}{0,95} \cdot 2,5} = 4,5; \quad c_\tau = \frac{14}{\frac{1,62}{0,95} \cdot 2,34} = 3,5;$$

$$c_{III} = \frac{4,5 \times 3,5}{\sqrt{4,5^2 + 3,5^2}} \approx 2,8.$$

Piesa rezistă în bune condiții. În secțiunea I, coeficientul de siguranță este prea mare, însă dimensiunile piesei sînt impuse de alte considerente.

Exemplul 7.14. Un ax dintr-o cutie de viteze are forma din fig. 7.8. Se dau dimensiunile: $D_1=500$ mm, $D_2=160$ mm, $\lambda_1=100$ mm, $\lambda_2=140$ mm, $d=80$ mm, $d_1=70$ mm, $r=2$ mm, $L=100$ mm, $l_1=100$ mm, $l_2=400$ mm, $l_3=120$ mm.

Cuplul transmis de la o roată la alta este $M_t=15\,000$ kgfcm și se consideră că variază după ciclu pulsator. Materialul axului este OL 50. Se cere verificarea la oboseală [24].

Rezolvare. Conform fig. 7.8, forțele tangențiale ale roților sînt:

$$P_1 = \frac{M_t}{R_1} = \frac{15\,000}{25} = 600 \text{ kgf};$$

$$P_2 = \frac{M_t}{R_2} = \frac{15\,000}{8} = 1\,875 \text{ kgf}.$$

Forțele în direcția liniei de angrenare sînt, cu $\alpha=20^\circ$

$$P_{z1} = \frac{P_1}{\cos \alpha} = \frac{600}{0,93} = 645 \text{ kgf}; \quad P_{z2} = \frac{P_2}{\cos \alpha} = \frac{1\,875}{0,93} = 2\,000 \text{ kgf}.$$

Cu aceste valori se construiesc diagramele de momente încovoietoare în planele I-I și 2-2.

În planul I-I

$$M_A = P_{z1} l_1 = 645 \times 10 = 6\,450 \text{ kgfcm}.$$

În planul 2-2

$$M_B = P_{z2} l_3 = 2\,000 \times 12 = 24\,000 \text{ kgfcm}.$$

Momentele variază triunghiular, conform celor două diagrame din fig. 7.8, d. Momentul de răsucire crește liniar, de la zero la maximum, pe lungimea de calare a roților, și rămîne constant între cele două roți dințate.

Verificarea se va face în cele trei secțiuni periculoase, notate pe fig. 7.8, a: mijlocul lagărului B, I și II. Se observă, în detaliul de sus, că spre a evita suprapunerea efectelor celor doi concentrați, pinionul din dreapta are o scobitură, pentru a nu ajunge pînă la racordarea arborelui.

Se determină eforturile unitare nominale în cele trei secțiuni. Intrucît diagrama de momente M_{P_2} se reduce, în partea din dreapta, la valori foarte mici, ea nu mai influențează practic pe

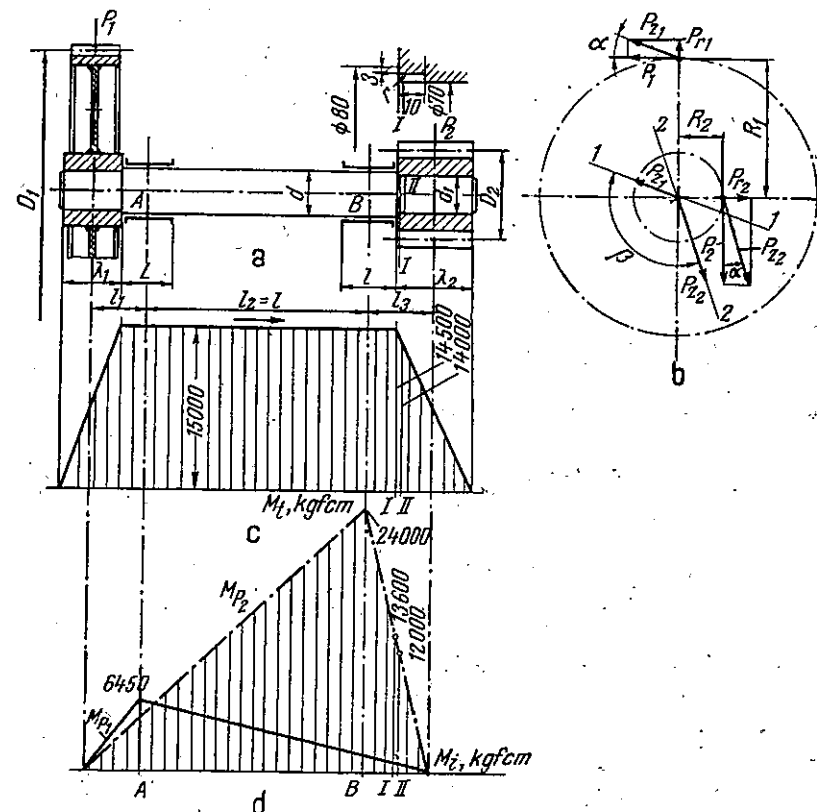


Fig. 7.8.

cealaltă, așa că se pot lua momentele numai din diagrama M_{P_2} . Solicitățile de încovoiere au loc prin ciclu simetric.

În secțiunea B

$$\sigma_v = \sigma_{max} = \frac{24\,000}{\frac{\pi \times 8^3}{32}} = 478 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{max} = \frac{15\,000}{\frac{\pi \times 8^3}{16}} = 150 \text{ kgf/cm}^2; \quad \tau_v = \tau_m = 75 \text{ kgf/cm}^2.$$

În secțiunea I, momentul încovoietor

$$M_{II} = P_2 \cdot \left(\frac{\lambda}{2} - r \right) = 2\,000 (7 - 0,2) = 13\,600 \text{ kgfcm.}$$

Se află eforturile unitare nominale

$$\sigma_v = \sigma_{max} = \frac{13\,000}{\frac{\pi \times 7^3}{32}} = 400 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{max} = \frac{14\,500}{\frac{\pi \times 7^3}{16}} = 216 \text{ kgf/cm}^2; \quad \tau_v = \tau_m = 108 \text{ kgf/cm}^2.$$

În secțiunea II, momentul încovoietor

$$M_{III} = P_2 \cdot \left(\frac{\lambda}{2} - 1 \right) = 2\,000 (7 - 1) = 12\,000 \text{ kgfcm.}$$

iar cel de răsucire, $M_t = 14\,000 \text{ kgfcm}$. Se găsește

$$\sigma_v = \sigma_{max} = \frac{12\,000}{\frac{\pi \times 7^3}{32}} = 356 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$\tau_{max} = \frac{14\,000}{\frac{\pi \times 7^3}{16}} = 210 \text{ kgf/cm}^2; \quad \tau_v = \tau_m = 105 \text{ kgf/cm}^2.$$

Se determină coeficienții $\beta_k, \varepsilon, \gamma$ în cele trei secțiuni.

— În secțiunea B:

Nu există concentrator; deci $\beta_k = 1$. Factorul dimensional se ia din fig. 4.42, curba I, pentru $d = 80 \text{ mm}$: $\varepsilon = 0,73$. Coeficientul de calitate se ia din fig. 4.49, curba 3 (piesă finisată prin strunjire): $\gamma = 0,92$.

— În secțiunea I:

Pentru solicitarea de încovoiere, din fig. 4.4, curba de jos, pentru $\frac{r}{d} = \frac{2}{70} = 0,03$ se găsește $\beta_{k0} = 2,15$. Pentru raportul $\frac{D}{d} = \frac{80}{70} = 1,14$, curba I din fig. 4.11 dă $\xi = 0,70$, iar formula (4.8) dă $\beta_k = 1,8$. De pe fig. 4.42, curba I, la $d = 70 \text{ mm}$, se găsește $\varepsilon = 0,75$.

Pentru răsucire, din fig. 4.10, curba de jos, se află $\beta_{k0} = 1,65$. Apoi, din fig. 4.11, se ia $\xi = 0,63$ și rezultă $\beta_k \approx 1,4$. Din fig. 4.42, $\varepsilon = 0,75$.

— În secțiunea II:

Este vorba de un montaj presat și se folosesc fig. 4.26—4.28.

Pentru solicitarea de încovoiere, fig. 4.26 dă $\frac{\beta_{k0}}{\varepsilon} = 3,2$, valoare potrivită materialului piesei. Pentru răsucire, se aplică formula (4.10)

$$\frac{\beta_{kr}}{\varepsilon} = 1 + 0,6 (3,2 - 1) = 2,3.$$

În vederea verificării piesei, se iau caracteristicile mecanice ale materialului, din anexa I: $\sigma_c = 27 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1} = 24 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_0 = 32 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_{-1} = 14 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_0 = 17 \text{ kgf/mm}^2$. Se calculează

$$\psi_r = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0} = \frac{2 \times 14 - 17}{17} = 0,65.$$

În secțiunea B, coeficienții de siguranță sînt:

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon} \sigma_v} = \frac{24}{\frac{1}{0,73 \times 0,92} \times 4,78} = 3,36;$$

$$c_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{\beta_k}{\varepsilon} \tau_v + \psi_r \tau_m} = \frac{14}{\frac{1}{0,73 \times 0,92} \times 0,75 + 0,65 \times 0,75} = 8,75;$$

$$c_B = \frac{c_\sigma c_\tau}{\sqrt{c_\sigma^2 + c_\tau^2}} = \frac{3,36 \times 8,75}{\sqrt{3,36^2 + 8,75^2}} = 3,14.$$

În secțiunea I, folosind aceleași formule, rezultă

$$c_\sigma = \frac{24}{\frac{1,8}{0,75 \times 0,92} \times 4} = 2,3;$$

$$c_\tau = \frac{14}{\frac{1,4}{0,75 \times 0,92} \times 1,08 + 0,65 \times 1,08} = 4,84;$$

$$c_I = \frac{2,3 \times 4,84}{\sqrt{2,3^2 + 4,84^2}} = 2,08.$$

În secțiunea II:

$$c_o = \frac{24}{\frac{3,2}{0,92} \times 3,56} = 1,93;$$

$$c_t = \frac{14}{\frac{2,3}{0,92} \times 1,05 + 0,65 \times 1,05} = 4,24;$$

$$c_{II} = \frac{1,93 \times 4,24}{\sqrt{1,93^2 + 4,24^2}} = 1,76.$$

Coeficienții de siguranță obținuți arată că piesa este corespunzătoare.

Exemplul 7.15. Se va arăta, după un exemplu din lucrarea [24], adaptat metodei de calcul folosite de noi, modul cum se face verificarea la oboseală a unui arbore cotit. În fig. 7.9 se arată arborele cotit al unei pompe cu piston, cu dublu efect. Dimensiunile indicate pe desen, sînt: $R=90$ mm, $d=70$ mm, $r=5$ mm, $L=140$ mm, $a=48$ mm, $b=80$ mm, $a_0=64$ mm, $D=1100$ mm, $\lambda=150$ mm, $l_1=150$ mm, $l=300$ mm. Materialul este OL 50. Arborele are suprafața rectificată, netratată. Greutatea roții de curea

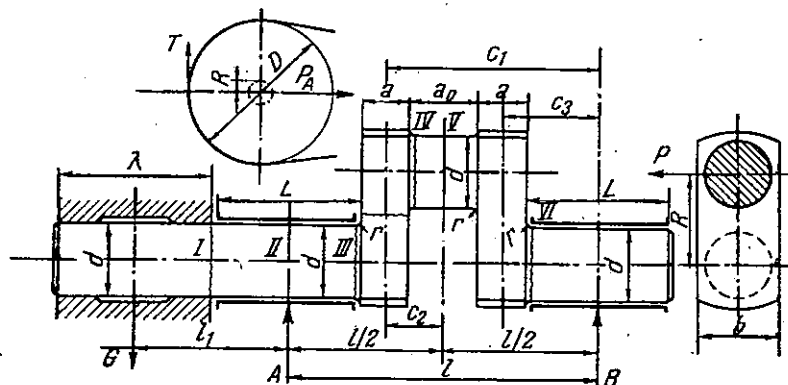


Fig. 7.9.

— volantul — este $G=900$ kgf. Forța periferică la roata de curea este $T=147$ kgf. Forța pe piston este $P=1200$ kgf. Solicitarea de încovoiere în arbore, datorită rotirii, este simetrică. Solicitarea de răsucire este pulsatoare, cuplul rezistent fiind nul la trecerea manivelei prin punctele moarte. Se cere verificarea la oboseală a arborelui în secțiunile I—VI.

Rezolvare. Se determină întâi reacțiunile și diagramele momentelor încovoietoare. Pentru poziția orizontală a arborelui cotit (manivela la punctul mort), se consideră forța totală dată de curea în axul arborelui

$$P_A \approx 2,5; T = 2,5 \times 147 = 370 \text{ kgf.}$$

Cu schema de încărcare din fig. 7.10, reacțiunile orizontale sînt:

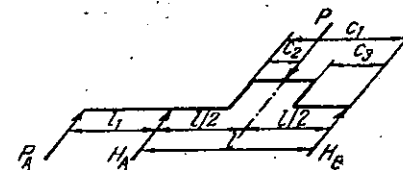


Fig. 7.10.

$$H_A = \frac{P \frac{l}{2} - P_A (l + l_1)}{l} = \frac{1200 \times 15 - 370 \times 45}{30} = 45 \text{ kgf.}$$

$$H_B = P - P_A - H_A = 1200 - 370 - 45 = 785 \text{ kgf.}$$

Forțele orizontale dau diagrama de momente desenată cu linie întreruptă în fig. 7.13, avînd

$$M_{II} = M_{IA} = P_A l_1 = 370 \times 15 = 5550 \text{ kgfcm.}$$

$$M_{IV} = H_B \frac{l}{2} = 785 \times 15 = 11800 \text{ kgfcm.}$$

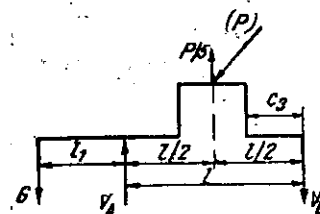


Fig. 7.11.

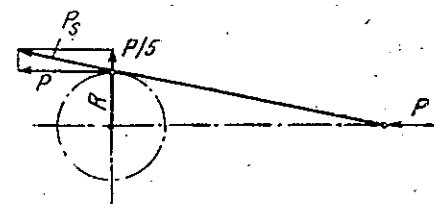


Fig. 7.12.

Pentru forțele verticale se folosește schema din fig. 7.11. Se vede pe fig. 7.12 că pentru poziția verticală a manivelei forța radială (verticală) este $\frac{P}{5}$. Reacțiunile sînt:

$$V_A = \frac{G (l_1 + l_2) - \frac{P}{5} \times \frac{l}{2}}{l} = \frac{900 \times 45 - 240 \times 15}{30} = 1230 \text{ kgf};$$

$$V_B = \frac{G l_1 + \frac{P}{5} \times \frac{l}{2}}{l} = \frac{900 \times 15 + 240 \times 15}{30} = 570 \text{ kgf.}$$

Momentele încovoietoare — linia plină din fig. 7.13 — sînt:

$$M_{II} = Gl_1 = 900 \times 15 = 13\,500 \text{ kgfcm};$$

$$M_{IV} = -V_B \times \frac{l}{2} = -570 \times 15 = -8\,550 \text{ kgfcm}.$$

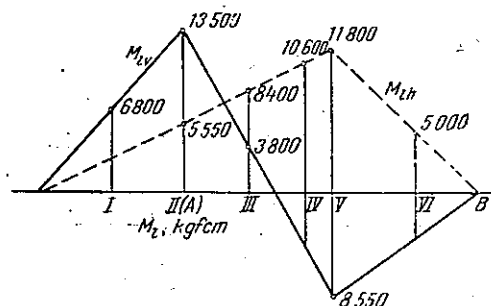


Fig. 7.13.

Pe baza acestor valori se calculează eforturile unitare nominale în cele șase secțiuni, întocmind tabela 7.2. Se observă că cele două diagrame de momente încovoietoare nu se compun, ci în fiecare secțiune se ia cel mai mare dintre ele.

Tabela 7.2

Secțiunea	d cm	W cm ³	W _p cm ³	M _t max kgfcm	M _t kgfcm	$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \sigma_0$ kgf/cm ²	$\tau_{\max}$ kgf/cm ²	$\tau_0 = \tau_m$ kgf/cm ²
I	70	336	672	6 800	8 100	200	120	60
II	70	336	672	13 500	8 100	400	120	60
III	70	336	672	8 400	8 100	250	120	60
IV	70	336	672	10 600	—	315	—	—
V	70	336	672	11 800	—	350	—	—
VI	70	336	672	5 000	—	148	—	—

Se determină coeficienții β_k , ε , γ . Conform fig. 4.49, pentru întregul arbore se va lua $\gamma = 0,95$.

În secțiunea I, concentratorul este un montaj presat. Conform fig. 4.26, curba I, se ia $\frac{\beta_{k\sigma}}{\varepsilon} = 3,2$. Pentru răsucire, $\frac{\beta_{k\tau}}{\varepsilon} = 1 + 0,6(3,2 - 1) = 2,3$.

În secțiunea II nu există concentrator, deci $\beta_k = 1$. După fig. 4.42, curba I, rezultă $\varepsilon = 0,75$.

Pentru racordările dintre manivelă și fus sau maneton, se determină, în baza notațiilor din fig. 4.24 și 4.25, coeficienții

$$\frac{r}{h} = \frac{5}{48} \approx 0,1; \quad \frac{r}{d} = \frac{5}{70} \approx 0,07.$$

Cu ajutorul fig. 4.24 și 4.25 se găsește:

— pentru secțiunile III și VI (racordare între fus și manivelă)

$$\frac{\beta_k}{\varepsilon} = 4,5;$$

— pentru secțiunea IV

$$\frac{\beta_k}{\varepsilon} = 2,8.$$

Acești coeficienți se vor aplica atât solicitărilor de încovoiere, cât și de răsucire.

În secțiunea V, la fel ca în II, $\beta_k = 1$, $\varepsilon = 0,75$.

Conform anexei I, materialul are $\sigma_{-1} = 24 \text{ kgf/mm}^2$, $\tau_{-1} = 14 \text{ kgf/mm}^2$.

La exemplul 7.14 s-a determinat $\psi_r = 0,65$. Aplicînd relațiile (6.5), (6.29) și (6.70) se calculează coeficienții de siguranță, ale căror valori sînt înscrise în tabela 7.3. Valorile obținute sînt corespunzătoare; deci arborele este bine dimensionat.

Tabela 7.3

Secțiunea	σ_0 kgf/mm ²	$\frac{\beta_{k\sigma}}{\varepsilon \gamma}$	c_σ Formula (6.5)	$\tau_0 = \tau_m$ kgf/mm ²	$\frac{\beta_{k\tau}}{\varepsilon \gamma}$	c_τ Formula (6.29)	c Formula (6.70)
I	2,0	$\frac{3,2}{0,95}$	3,56	0,6	$\frac{2,3}{0,95}$	7,58	3,22
II	4,0	$\frac{1}{0,75 \cdot 0,95}$	4,28	0,6	$\frac{1}{0,75 \cdot 0,95}$	11,4	4,00
III	2,5	$\frac{4,5}{0,95}$	2,0	0,6	$\frac{4,5}{0,95}$	4,34	1,81
IV	3,15	$\frac{2,8}{0,95}$	2,59	—	—	—	2,59
V	3,5	$\frac{1}{0,75 \cdot 0,95}$	4,88	—	—	—	4,88
VI	1,48	$\frac{4,5}{0,95}$	3,42	—	—	—	3,42

7.2. ȘURUBURI

Pentru calculul șuruburilor la solicitări variabile este necesar a se face unele precizări. Când este vorba de șuruburi cu strângere inițială, trebuie calculate forța datorită strângerii și forța datorită sarcinii variabile. Explicații complete asupra acestui calcul se dau în lucrările [4], [5], [94].

Se notează :

P_0 — forța de prestrângere din șurub ;

P — forța datorită exploatarei, în cazul nostru de obicei variabilă între zero și P ;

P_z — forța suplimentară, variabilă, aplicată șurubului, datorită forței de exploatare P .

Forța P_0 depinde de forța aplicată asupra cheii, la strângerea șurubului. Ținând seamă de cuplul de frecare, dacă lungimea activă a cheii este $l = 12d$ — unde d este diametrul exterior al filetului — se stabilește relația [94]:

$$P_0 \approx 80 Q, \quad (7.1)$$

Q fiind forța aplicată asupra cheii.

Forța suplimentară are valoarea maximală

$$P_z = \frac{c_s}{c_s + c_f} \times P = \delta P, \quad (7.2)$$

unde s-au notat :

$$c_s = \frac{E_s A_s}{l_s}; \quad c_f = \frac{E_f A_f}{l_f}. \quad (7.3)$$

Mărimea c_s este constanta elastică a șurubului, iar c_f a piesei strinse de șurub. E_s, E_f sînt modulele de elasticitate, A_s, A_f ariile secțiunilor și l_s, l_f lungimile respective. De obicei aria secțiunii șurubului variază în lungul său, avînd mărimi $A_{s1}, A_{s2}, \dots$ pe lungimile $l_{s1}, l_{s2}, \dots$. Tot așa, piesele strinse au module de elasticitate, arii și lungimi diferite.

Ținînd seamă de aceasta, mărimile c_s și c_f au expresiile

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{E_s} \sum \frac{l_{si}}{A_{si}}, \quad (7.4)$$

$$\frac{1}{c_f} = \sum \frac{l_{fi}}{E_{fi} A_{fi}}. \quad (7.5)$$

Cercetările făcute au arătat că, în lipsa unor date mai precise, se poate lua $\delta = 0,2 \dots 0,3$.

Cu aceste valori, forța maximă în timpul solicitării variabile este

$$P_{max} = P_0 + P_z = P_0 + \delta P$$

iar cea minimă

$$P_{min} = P_0.$$

Ca urmare, forța medie și amplitudinea forței variabile sînt

$$P_m = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} = P_0 + \frac{\delta P}{2}, \quad (7.6)$$

$$P_v = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} = \frac{\delta P}{2}. \quad (7.7)$$

În consecință, dacă A este aria secțiunii nete a șurubului, eforturile unitare nominale sînt

$$\sigma_{max} = \frac{P_0 + \delta P}{A}; \quad \sigma_m = \frac{P_0 + \frac{1}{2} \delta P}{A}; \quad \sigma_v = \frac{\delta P}{2A}. \quad (7.8)$$

În ce privește forța de prestrângere P_0 , se prescrie ca efortul unitar produs de ea, $\sigma_0 = P_0/A$, să nu depășească limitele :

— la oțeluri aliate ;

$$\sigma_0 = (0,5 \dots 0,6) \sigma_c$$

— la oțeluri carbon ;

$$\sigma_0 = (0,6 \dots 0,7) \sigma_c$$

Aici, σ_0 este efortul unitar de prestrângere (static), neavînd nici o legătură cu simbolul folosit (în alte părți ale lucrării) pentru rezistența la oboseală, prin ciclu pulsator.

Factorii care influențează rezistența la oboseală a șuruburilor sînt arătați la cap. 4. O expunere detaliată asupra lor se găsește în monografia lui I. A. Birger [4] și în lucrările [5], [63].

În afara metodelor de calcul descrise la cap. 6, în lucrarea [5] se recomandă calcularea coeficientului de siguranță la solicitări variabile cu relația

$$c = \frac{\sigma_{-1k} \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{r_2}}}}{\sigma_v}. \quad (7.9)$$

Pentru σ_{-1k} , precum și pentru β_k , autorii lucrării indică datele din tabela 7.4.

Tabela 7.4

Concentrarea eforturilor unitare la șuruburi

Materialul șurubului	σ_{-1} kgf/mm ²	σ_{-1k} kgf/mm ²		β_k	
		Șuruburi tăiate	Șuruburi rulate	Șuruburi tăiate	Șuruburi rulate
OL34	18	5	6,5	3,6	2,8
OL42	22	6	8	3,7	2,8
Oțel crom	30	7,5	10	4,0	3,0
Oțel crom-mangan-siliciu	30	7,5	10	4,0	3,0
Oțel crom-nichel-molibden	44	9,5	12,5	4,6	3,5
Oțel crom-nichel-molibden	45	10	13	4,5	3,5

Observație. Datele se referă la șuruburi metrice cu $d_0 < 16$ mm. Pentru diametre mai mari, valorile σ_{-1k} din tabelă se reduc: cu 20...35% pentru $d_0 = 25...40$ mm; cu 40...60% pentru $d_0 = 50...80$ mm; d_0 = diametrul mediu al filetului.

În general, datorită forței de prestrângere mare, șuruburile cu prestrângere nu pot fi calculate prin metoda Serensen, întrucît ciclul este cuprins între cel pulsator și solicitarea statică. La șuruburi care transmit mișcări se pot întîlni solicitări cuprinse între ciclul simetric și solicitarea statică; deci unde metoda Serensen este aplicabilă.

Ruperea șuruburilor are caracterul de rupere fragilă, ceea ce face ca diagrama schematizată a rezistențelor la oboseală să aibă forma din fig. 6.6 sau 6.8. Rezultă că nu se va folosi în schematizare limita de curgere; deci nu se va aplica metoda de calcul dată de formula (6.88). Ca urmare, la șuruburile cu prestrângere, calculul coeficientului de siguranță se poate face cu formulele (6.22), (6.21), (6.31) sau (7.9).

Exemplul 7.16. Să se determine coeficientul efectiv de concentrare pentru un șurub M 14×2, făcut din oțel aliat cu $\sigma_r = 80$ kgf/mm², solicitat la întindere-compresiune.

Rezolvare. Conform fig. 4.30, curba 3, se găsește $\beta_{k0} = 2,3$, corespunzător lui M 12, oțel cu $\sigma_r = 40$ kgf/mm². După fig. 4.31, rezultă $\xi = 1,6$, iar formula (4.11) dă $\beta_k = 1,6 \times 2,3 = 3,68$. După fig. 4.45 se află factorul dimensional $\epsilon = 0,8$. Ca urmare, rezultă

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{\epsilon} = \frac{3,68}{0,8} = 4,6.$$

Valoarea este similară celor din tabela 7.4, care, pentru M 14, cuprind și factorul dimensional.

Exemplul 7.17. Să se determine rezistența admisibilă, prin ciclu simetric și prin ciclu pulsator, pentru șuruburi M 12, făcute din OL 38, avînd $\sigma_{-1} = 18,5$ kgf/mm².

Rezolvare. Conform tabelii 7.4, coeficientul de concentrare, inclusiv factorul dimensional, este $\beta_{kP} = 3,65$. (S-a interpolat între OL 34 și OL 42).

Pentru ciclu simetric, rezistența la oboseală, luînd coeficientul de siguranță $c = 2$, este dată de relația (6.8)

$$\sigma_{aIII} = \frac{\sigma_{-1}}{c \beta_{kP}} = \frac{18,5}{2 \times 3,65} \approx 2,50 \text{ kgf/mm}^2.$$

Pentru ciclu pulsator, relația (6.38), cu $k = 1$ și $\psi = 0$, [75], dă

$$\sigma_{aII} = \frac{\sigma_{-1}}{c} \cdot \frac{1+k}{k \cdot \beta_{kP} + \psi} = \frac{18,5}{2} \cdot \frac{1+1}{1 \times 3,65} = 5,00 \text{ kgf/mm}^2.$$

Dacă se lua ψ conform datelor din tabela I, rezulta o valoare σ_{aII} mai mică.

Exemplul 7.18. O tijă de piston este solicitată printr-un ciclu asimetric, avînd $P_{max} = 7$ tf și $P_{min} = -5$ tf. Tijă se termină prin filet M 68. Materialul este oțel cu $\sigma_r = 60$ kgf/mm², $\sigma_c = 30$ kgf/mm², $\sigma_{-1t} = 20$ kgf/mm², $\sigma_{0t} = 30$ kgf/mm². Să se calculeze coeficientul de siguranță.

Rezolvare. După fig. 4.32, se găsește coeficientul de concentrare, pe curba 3, $\beta_k = 3,0$. După fig. 4.45, factorul dimensional este $\epsilon = 0,50$. Rezultă coeficientul de concentrare complex

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{\epsilon} = \frac{3,0}{0,50} = 6.$$

Un rezultat similar se obține și cu ajutorul tabelii 7.4.

Șurubul are $d_1 = 60,2$ mm, iar aria secțiunii este $A = 28,4$ cm².

Imbinarea între tijă și piston este asigurată fără prestrângere, ceea ce face ca eforturile unitare nominale să aibă valorile

$$\sigma_{max} = \frac{7000}{28,4} = 247 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}; \quad \sigma_{min} = -\frac{5000}{28,4} = -176 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};$$

$$\sigma_m = \frac{247 - 176}{2} = 0,35 \text{ kgf/mm}^2; \quad \sigma_v = \frac{247 + 176}{2} = 2,12 \text{ kgf/mm}^2.$$

Se determină coeficientul

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1t} - \sigma_{0t}}{\sigma_{0t}} = \frac{2 \times 20 - 30}{30} = 0,33.$$

Coeficientul de siguranță, calculat prin formula (6.29), este

$$c = \frac{20}{6 \times 2,12 + 0,33 \times 0,35} = 1,56.$$

Dacă se folosește formula (6.88), atunci rezultă

$$c = \frac{20}{\sqrt{6^2 \times 2,12^2 + 0,35^2 \left(\frac{20}{30}\right)^2}} = 1,57.$$

Solicitarea fiind apropiată de cea simetrică, ambele metode dau același rezultat.

Exemplul 7.19. Un șurub pentru cap de bielă are forma și dimensiunile din fig. 7.14. Materialul este oțel 30 CN 35, STAS 793-53, avînd $\sigma_r = 100 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_c = 70 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{-1t} = 30 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_{0t} = 73 \text{ kgf/mm}^2$. Forța de exploatare este $P = 1\,000 \text{ kgf}$. Să se facă verificarea șurubului, dacă se ia $c_f = 3c_s$.

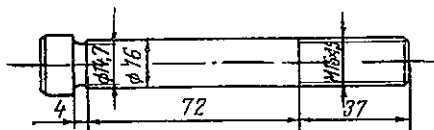


Fig. 7.14.

Rezolvare. Dimensiunile șurubului sînt: $d = 16 \text{ mm}$, $d_1 = 14,05 \text{ mm}$, $d_m \approx 15 \text{ mm}$.

Se calculează constanta elastică a șurubului, cu dimensiunile din desen, folosind formula (7.4)

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{2,1 \times 10^6} \left(\frac{0,4 \times 4}{\pi \times 1,47^2} + \frac{7,2 \times 4}{\pi \times 1,6^2} + \frac{3,7 \times 4}{\pi \times 1,405^2} \right) = 2,95 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{kgf}};$$

$$c_s = 0,339 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}; \quad c_f = 3c_s = 1,02 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}.$$

În baza formulei (7.2),

$$\delta = \frac{c_s}{c_s + c_f} = \frac{1}{1 + \frac{c_f}{c_s}} = \frac{1}{1 + 3} = 0,25.$$

Forța suplimentară

$$P_z = \delta P = 0,25 \times 1\,000 = 250 \text{ kgf}.$$

Forța de prestrîngere se alege așa ca să producă în șurub un efort unitar

$$\sigma_0 = 0,5\sigma_c = 0,5 \times 7\,000 = 3\,500 \text{ kgf/cm}^2.$$

Rezultă forța de prestrîngere

$$P_0 = 3\,500 \times \frac{\pi \times 1,405^2}{4} = 5\,420 \text{ kgf}.$$

Conform relațiilor (7.8), rezultă

$$\sigma_{\max} = \frac{5\,420 + 250}{\frac{\pi \times 1,405^2}{4}} = 3\,660 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}; \quad \sigma_m = \frac{5\,420 + 125}{\frac{\pi \times 1,405^2}{4}} = 3\,580 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};$$

$$\sigma_v = \frac{125}{\frac{\pi \times 1,405^2}{4}} = 80 \text{ kgf/cm}^2.$$

Luînd un coeficient de frecare $\mu = 1$, se află momentul de răsucire produs prin strîngerea piuliței

$$M_t = \frac{\mu P_0 a_m}{2} = \frac{0,1 \times 5\,420 \times 1,5}{2} = 406 \text{ kgfcm}.$$

Acesta produce în șurub un efort unitar static

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} = \frac{406}{\frac{\pi \times 1,405^3}{16}} = 750 \text{ kgf/cm}^2.$$

Dacă se ia pentru acest oțel $\tau_c = 35 \text{ kgf/mm}^2$, atunci rezultă

$$c_r = \frac{\tau_c}{\tau} = \frac{35}{7,5} = 4,67.$$

Solicitarea la întindere fiind apropiată de cea statică, se verifică coeficientul de siguranță cu formulele (6.24), (6.21), (6.31) și (7.9).

Coeficientul de concentrare se calculează cu ajutorul fig. 4.30 și 4.31. De pe curba 3 a fig. 4.30, rezultă $\beta_{k0} = 2,35$, iar din fig. 4.31, $\xi = 1,72$, ceea ce dă $\beta_k = 2,35 \times 1,72 = 4,04$. Această valoare corespunde șurubului cu $d = 12 \text{ mm}$. De pe fig. 4.45, se ia $\varepsilon = 0,8$, ceea ce dă

$$\beta_{kP} = \frac{\beta_k}{\varepsilon} = \frac{4,04}{0,8} \approx 5.$$

Aplicînd formula (6.24), rezultă

$$c_\sigma = \frac{1}{5 \frac{0,8}{30} + \frac{35,8}{100}} = 2,03.$$

Cu formula (6.21) se găsește

$$c_o = \frac{70}{36,6} = 1,91.$$

Pentru aplicarea formulei (6.31), se calculează coeficientul

$$\xi = 2 \frac{\sigma_r}{\sigma_{of}} - 1 = 2 \frac{100}{73} - 1 = 1,74$$

și rezultă

$$c_o = \frac{100}{5 \times 1,74 \times 0,8 + 35,8} = 2,33.$$

Aplicarea formulei (7.9) dă

$$c_o = \frac{\frac{\sigma_{-1}}{\beta_{kP}} \sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_r}}}{\sigma_v} = \frac{\frac{100}{5} \sqrt{1 - \frac{35,8}{100}}}{0,8} = 20.$$

Dintre aceste valori se alege cea mai mică și se calculează coeficientul de siguranță al solicitării compuse, cu relația (6.70)

$$c = \frac{1,91 \times 4,67}{\sqrt{1,91^2 + 4,67^2}} = 1,77.$$

Valoarea obținută este satisfăcătoare.

7.3. TIJE SOLICITATE LA ÎNTINDERE ȘI COMPRESIUNE

Exemplul 7.20. O bară de secțiune circulară este solicitată la întindere printr-un ciclu oscilant, forța variind între $P_{max} = 7\,000$ kgf și $P_{min} = 3\,000$ kgf. Să se dimensioneze bara, dacă materialul este un oțel cu $\sigma_c = 30$ kgf/mm² și $\sigma_{-1t} = 21$ kgf/mm².

Rezolvare. Modul de solicitare nu se încadrează în domeniul de aplicare a formulei Serensen. Pe baza formulei Soderberg (6.39), luând $c = 2$, rezistența admisibilă

$$\sigma_a = \frac{21}{2} \times \frac{1+0,4}{0,4 + \frac{21}{30}} = 13,4 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$k = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}} = \frac{7-3}{7+3} = 0,4.$$

S-a luat $\beta_k = 1$, $\gamma = 1$, iar într-un prim calcul $\varepsilon = 1$.

Cu aceasta se dimensionează bara

$$A_{nec} = \frac{P_{max}}{\sigma_a} = \frac{7\,000}{13,4} = 5,22 \text{ cm}^2; \quad d = 2,58 \text{ cm}.$$

Se alege $d = 26$ mm. Oțelul fiind de tipul oțel carbon, din curba 1 a fig. 4.42 se ia $\varepsilon = 0,9$.

Se recalculează rezistența admisibilă

$$\sigma_a = \frac{21}{2} \times \frac{1+0,4}{0,9 + \frac{21}{30}} = 12,8 \text{ kgf/mm}^2.$$

De asemenea se calculează și prin metoda coeficientului de reducere al rezistenței admisibile, formulele (6.40), (6.41):

$$\varphi = \frac{1+0,4}{1 + \frac{0,4}{0,9 \cdot 21}} \approx 0,86;$$

$$\sigma_{as} = \frac{\sigma_c}{c} = \frac{30}{2} = 15 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$\sigma_a = \varphi \cdot \sigma_{as} = 0,86 \times 15 = 12,9 \text{ kgf/mm}^2.$$

Se obțin valori practic egale. Noua dimensionare dă

$$A_{nec} = \frac{7\,000}{12,9} = 5,47 \text{ cm}^2; \quad d = 2,64 \text{ cm}.$$

Se menține valoarea anterioară $d = 26$ mm.

Exemplul 7.21. Să se determine coeficientul de siguranță al unei tije de bielă, de diametru $d = 60$ mm, în care forța maximă de compresiune este de 52 tf, iar cea maximă de întindere, 12 tf. Materialul este oțel cu $\sigma_c = 5\,000$ kgf/cm², $\sigma_{-1t} = 2\,900$ kgf/cm² și $\psi = 0,16$.

Rezolvare. În calcul se va lua ca efort unitar maxim cel de compresiune, respectiv se vor inversa semnele algebrice. Rezultă

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 28,2 \text{ cm}^2,$$

$$\sigma_{max} = \frac{52\,000}{28,2} = 1\,840 \text{ kgf/cm}^2, \quad \sigma_{min} = -\frac{12\,000}{28,2} = -425 \text{ kgf/cm}^2,$$

$$\sigma_m = \frac{18,4 - 4,25}{2} = 7,1 \text{ kgf/mm}^2, \quad \sigma_v = \frac{18,4 + 4,25}{2} = 11,3 \text{ kgf/mm}^2.$$

Se ia $\beta_k = 1$, $\gamma = 1$, După curba 1 din fig. 4.42, se ia $\varepsilon = 0,78$.

Prin metoda Serensen se află, cu formula (6.29),

$$c = \frac{29}{\frac{1}{0,78} \times 11,3 + 0,16 \times 7,1} = 1,85.$$

Prin metoda nouă, cu formula (6.88),

$$c = \frac{29}{\sqrt{\frac{1}{0,78^2} \times 11,3^2 + 7,1^2 \left(\frac{29}{50}\right)^2}} = 1,92$$

Rezultatele sînt, practic, identice.

7.4. ARCURI ELICOIDALE

Efortul unitar în arcul elicoidal, solicitat în ansamblul său la întindere sau compresiune, este

$$\tau' = \frac{8PD}{\pi d^3}, \quad (7.10)$$

în care P este forța în lungul axului arcului, D — diametrul de înfășurare și d — diametrul firului arcului. Pentru a ține seamă de solicitările suplimentare, datorite înclinării spirelor, efortul unitar se ia

$$\tau = \alpha \tau' = \alpha \frac{8PD}{\pi d^3}, \quad (7.11)$$

în care α , funcție de raportul D/d , se ia din tabela 7.5.

Tabela 7.5

$\frac{D}{d}$	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
α	1,70	1,55	1,39	1,29	1,24	1,20	1,18	1,16	1,14

Coeficienți β_k , ε se iau egali cu unitatea, iar γ depinde de tratamentul aplicat arcului.

În afara formulelor uzuale din cap. 6, care se vor folosi, în lucrarea [5] se dă și următoarea formulă de calcul al coeficientului de siguranță

$$c = \frac{\tau_{-1} + (1 - \psi_r) \tau_m}{\tau_v + \tau_m}. \quad (7.12)$$

Un studiu interesant asupra oboselii arcului este făcut în lucrarea [82].

Exemplul 7.22. Un arc de supapă are diametrele $D=60$ mm și $d=6$ mm. El este făcut dintr-un oțel avînd $\tau_r=80$ kgf/mm², $\tau_c=50$ kgf/mm², $\tau_{-1}=30$ kgf/mm², $\psi_r=0,2$. În timpul funcționării, efortul unitar, calculat cu formula (7.10), variază între $\tau_{max}=35$ kgf/mm² și $\tau_{min}=18,8$ kgf/mm². După confectionare, arcul a fost călit și ecrisat cu alic, ceea ce duce la un coeficient de calitate $\gamma=1,55$. Se cere coeficientul de siguranță al arcului.

Rezolvare. Se calculează eforturile unitare cu formula (7.11) în care, pentru $\frac{D}{d} = \frac{60}{6} = 10$, se ia $\alpha=1,14$

$$\tau_{max} = 35 \times 1,14 = 40 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$\tau_{min} = 18,8 \times 1,14 = 21,4 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$\tau_m = 30,7 \text{ kgf/mm}^2, \quad \tau_v = 9,3 \text{ kgf/mm}^2.$$

Arcul avînd $R = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}} = 0,535$, nu se aplică formula lui Serensen.

Cu formula (6.21), rezultă

$$c_c = \frac{\tau_c}{\tau_m + \tau_v} = \frac{50}{30,7 + 9,3} = 1,25.$$

Cu formula (6.88), se găsește

$$c = \frac{\tau_{-1}}{\sqrt{\left(\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma}\right)^2 \tau_v^2 + \tau_m^2 \left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_c}\right)^2}} = \frac{30}{\sqrt{\frac{1}{1,55^2} \times 9,3^2 + 30,7^2 \left(\frac{30}{50}\right)^2}} = 1,55.$$

Folosind formula (7.12), rezultă

$$c = \frac{30 + (1 - 0,2) 30,7}{9,3 + 30,7} = 1,36.$$

Se obișnuiește a calcula și coeficientul de siguranță pe baza amplitudinilor, cu formula (6.55)

$$c = \frac{\tau_{-1} - \psi_r \tau_m}{\frac{\beta_k}{\varepsilon \gamma} \times \tau_v} = \frac{30 - 0,2 \times 30,7}{\frac{1}{1,55} \times 9,3} = 4.$$

Luînd cea mai mică dintre valori, $c=1,25$, rezultă că arcul se află la limita minimală de rezistență.

Exemplul 7.23. Un arc elicoidal este făcut dintr-un oțel cu $\sigma_r=180$ kgf/mm², $\tau_c=90$ kgf/mm², $\tau_{-1}=45$ kgf/mm². El este solicitat printr-un ciclu oscilant, în care efortul unitar — calculat cu

formula. (7.11) — variază între $\tau_{max}=40 \text{ kgf/mm}^2$ și $\tau_{min}=24 \text{ kgf/mm}^2$. Să se determine coeficientul de siguranță, pe baza criteriului $R=\text{const}$, dacă se ia drept curbă a ciclurilor limită o parabolă, de ecuație

$$\tau_{vL} = \tau_{-1} \left(1 + \frac{\tau_{mL}}{\tau_c} \right)^2.$$

Tabela 7.6

Punctul	1	2	3	4
τ_{mL} , kgf/mm ²	20	40	60	80
τ_{vL} , kgf/mm ²	42,7	36,2	25,0	9,45

Rezolvare. Pe baza ecuației date, se întocmește tabela 7.6 și se construiește diagrama ciclurilor limită, prin puncte, ca în fig. 7.15. Se reprezintă punctul M de coordonate

$$\tau_m = \frac{40+24}{2} = 32 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$\tau_v = \frac{40-24}{2} = 8 \text{ kgf/mm}^2.$$

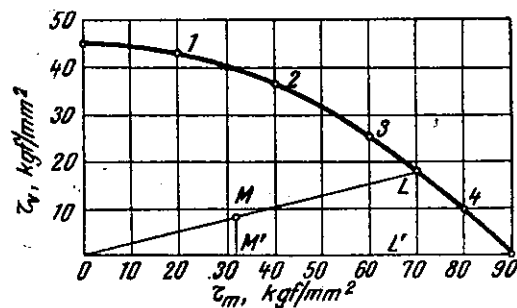


Fig. 7.15.

Ducînd linia OML , se află ciclul limită L . Luînd $\frac{\beta_k}{s\gamma} = 1$, coeficientul de siguranță se calculează cu formula (6.10)

$$c = \frac{\tau_{maxL}}{\tau_{max}} = \frac{\tau_{mL} + \tau_{vL}}{\tau_m + \tau_v} = \frac{OL' + L'L}{OM' + M'M} = \frac{70 + 18}{32 + 8} = 2,2.$$

Valoarea obținută este admisibilă.

7.5. ALTE PIESE SUPUSE LA SOLICITĂRI VARIABLE

a. **Îmbinări prin sudură.** Problema calculului de oboseală la îmbinări sudate este extrem de importantă în tehnică. Numeroase studii se ocupă de rezistența la oboseală a sudurilor și factorii de care depinde ea. Astfel este lucrarea lui A. E. Asnis, intitulată „Rezistența dinamică a îmbinărilor sudate, făcute din oțeluri cu conținut mic de carbon și oțeluri slab aliate” [2]. De asemenea, lucrarea lui H. A. Melhardt [42], tradusă în limba română, se ocupă de îmbinările sudate, supuse la solicitări statice și variabile. În cartea publicată de prof. C. C. Teodorescu și D. R. Mocanu [95] se găsesc de asemenea indicații asupra calculului la oboseală al îmbinărilor sudate. Date interesante se află și în lucrările [61], [63], [80].

Date fiind particularitățile calculului sudurilor, nu va fi expus aici; se recomandă folosirea literaturii indicate.

b. **Îmbinări niteute.** Metoda de calcul este cea uzuală. Indicații asupra rezistenței la oboseală a îmbinărilor niteute se dau în lucrările [21], [44], [80]. În special lucrarea [80] se ocupă de diversele aspecte ale oboselii elementelor din construcția avioanelor.

c. **Lațuri cu articulații.** În lucrarea [78] se indică modul de calcul la durabilitate — conform teoriei din § 6.6.2, 6.6.3 — pentru lațurile de tracțiune ale benzilor transportoare. În lucrarea [86] se descrie un studiu asupra oboselii lațurilor articulate.

BIBLIOGRAFIE

1. *Афанасьев, Н. Н.*, Статистическая теория усталостной прочности металлов. Киев, Изд. Академии Наук У.С.С.Р., 1953.
2. *Аснис, А. Е.*, Динамическая прочность сварных соединений из малоуглеродистой и низколегированных сталей. Москва, Киев, Машгиз, 1962.
3. *Беренов, Д. И.*, Расчеты деталей на прочность. Москва, Свердловск, Машгиз, 1959.
4. *Биргер, И. А.*, Расчет резьбовых соединений. Москва, Оборонгиз, 1959.
5. *Биргер, И. А., Шорр, Б. Ф., и Шнейдерович, Р. М.*, Расчет на прочность деталей машин. Москва, Машгиз, 1959.
6. *Борздыка, А. М.*, Методы горячих механических испытаний металлов. Москва, Металлургиздат, 1955.
7. *Buch, A.*, Wplyw procesu znczenia na wytrzymałość, wydłużenie, opór elektryczny i mikrotwardość. Prace Instytutu Lotnictwa, Warszawa, nr. 9, 1959.
8. *Buch, A.*, Korelacja pomiędzy granic znczenia a wskaźnikami wytrzymałości na rozciąganie, skracanie o podwójne scinanie w normalnych i podwyższonych temperaturach. Prace Instytutu Lotnictwa, Warszawa, nr. 9, 1959.
9. *Buzdugan, Gh.*, Determinarea rezistenței admisibile în construcția de mașini. Metalurgia, nr. 12, 1959.
10. *Buzdugan, Gh.*, Studiul rezistenței la oboseală și aplicațiile sale în construcția de mașini. Metalurgia, nr. 6, 1955.
11. *Buzdugan, Gh.*, Spre o standardizare a terminologiei în calculul de rezistență la solicitări variabile. Standardizarea, nr. 10, 1955.
12. *Buzdugan, Gh.*, Aspecte actuale ale studiului solicitărilor variabile, articol în publicația consfătuirii „Calculul la solicitări variabile în construcții de mașini și tehnologia modernă pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală”. București, Litografia Învățământului, 1955.
13. *Kudriavjev, I. V.*, Cercetări noi în domeniul rezistenței materialelor pentru construcții de mașini (traducere din limba rusă). București, I.D.T., 1952.
14. *Kimelman, D. N.*, Calculul organelor de mașini supuse la solicitări variabile. București, Editura tehnică, 1951.
15. * * * Colloquium on fatigue. Stockholm, May 25—27, 1955, Proceedings editors Waloddi Weibull, F. K. G. Odqvist, Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1956.
16. *Kudriavjev, I. V., Saverin, M. M. și Riabcenkov A. V.*, Metode pentru mărirea rezistenței superficiale a organelor de mașini. București, Editura tehnică, 1952.
17. DIN 50100. Standard pentru încercări de oboseală. Berlin, 1953.

18. *Дерягин, Г. А.*, Повышение выносливости деталей машин технологическими методами. Москва, Оборонгиз, 1960.
19. * * * Динамика и прочность коленчатых валов. Москва, Ленинград, Изд. Академии Наук С.С.С.Р., 1950.
20. *Faires, Virgil Moring*, Design of machine elements. New York, The Mac-Millan Company, 1955.
21. * * * Fatigue in aircraft structures. Proceedings of the International Conference held at Columbia University, January 30, 31 and February 1, 1956, edited by A. M. Freudenthal, New York, Academic Press, 1956.
22. *Gașanovici, A. A.*, Rezistența la oboseală a elementelor construcțiilor de mașini (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini nr. 10/1952.
23. *Groman, M. B.*, Despre coeficienții de siguranță în construcția de mașini (traducere din limba rusă) Buletinul construcțiilor de mașini, 1952.
24. *Hänchen, Richard*, Neue Festigkeitsberechnung für den Maschinenbau. München, Carl Hanser-Verlag, 1956.
25. * * * Handbuch der Werkstoffprüfung, II. Band, Die Prüfung der metallischen Werkstoffe, 2. Auflage, herausgegeben von E. Siebel, Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1955.
26. *Horovitz, B.*, Calculul la oboseală al organelor de mașini. Metalurgia, nr. 8, 1953.
27. *Карпенко, Г. В.*, Влияние активных жидких сред на выносливость стали. Киев, Изд. Академии Наук У.С.С.Р., 1955.
28. *Карпенко, Г. В.*, Влияние механической обработки на прочность и выносливость стали, Москва, Киев, Машгиз, 1959.
29. *Kimelman, D. N.*, Despre calculul coeficienților de siguranță în construcțiile de mașini (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, 1952.
30. *Kinasosvili, R. S. și Birger, I. A.*, Revenire asupra temei coeficienților de siguranță la tensiuni variabile (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, 1952.
31. *Когаев, В. П.*, Рассеяние характеристик выносливости в связи с концентрацией напряжений и абсолютными размерами. Вестник Машиностроения, № 1, 1959.
32. *Котов, О. К.*, Поверхностное упрочнение деталей машин химикотермическими методами. Москва, Машгиз, 1958.
33. *Кудрявцев, И. В.*, Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении, Москва, Машгиз, 1951.
34. *Кудрявцев, И. В., Саввина, Н. М., Баранова, Н. Б., Балабанов, Н. А.*, Конструкционная прочность чугуна с шаровидным графитом. Москва, Машгиз, 1957.
35. *Кудрявцев, И. В., и Саввина, Н. М.*, Сопротивление усталости крупных пластинчатых деталей и методы ее повышения. Вестник Машиностроения, № 1, 1959.
36. *Кудрявцев, И. В.*, Повышение прочности элементов конструкций и деталей машин. Москва, Машгиз, 1959.
37. *Лихтман, В. И., Ребиндер, П. А. и Карпенко, Г. В.*, Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов, Москва, Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1954.
38. *Любошин, М. И.*, Расчеты на прочность при переменных напряжениях. Минск, БПИ, 1959.
39. * * * Manualul inginerului mecanic. Vol. I, București, Editura tehnică, 1949.

40. * * * Mărirea rezistenței la oboseală a pieselor din oțel și fontă prin ecruisare superficială (traducere din limba rusă). București, I.D.T., 1956.
41. *Медведев, С. Ф.*, Циклическая прочность металлов. Москва, Машгиз 1961.
42. *Melhardt, H. A.*, Îmbinări sudate supuse la solicitări statice și variabile (traducere din limba germană). București, I.D.T., 1957.
43. * * * Metale și aliaje standardizate. Biblioteca Standardizării, Seria tehnică A, nr. 19, București, 1958.
44. * * * Metals Engineering Design, ASME Handbook, edited by O. J. Horger, New York, London, Toronto, Mc Graw-Hill Comp., 1953.
45. *Mikloši, C.*, Obosirea materialului de cale ferată. București, Imprimeria C.F.R., 1943.
46. *Nădășan, St., Bernath, Al. și Iovițiu, E.*, Studiul comportării la oboseală a oțelurilor carbon de calitate fabricate în R.P.R. (în stare normalizată). Studii și cercetări, Științe tehnice, Timișoara, nr. 1—2, 1960.
47. *Nădășan, St., Bernath, Al., Iovițiu, E. și Safta, V.*, Studiul comportării la oboseală a oțelurilor carbon de calitate fabricate în R.P.R. (în stare îmbunătățită). Studii și cercetări, Științe tehnice, Timișoara, nr. 3—4, 1961.
48. *Nădășan, St., Rothenstein, B., Horovitz, B. și Safta, V.*, Mărirea rezistenței la oboseală prin acoperiri electrolitice cu un aliaj Ni-Fe. Studii și cercetări, Științe tehnice, Timișoara, nr. 3—4, 1961.
49. * * * Некоторые вопросы усталостной прочности стали, под редакцией Н. Н. Давиденкова, Москва, Ленинград, Машгиз, 1953.
50. *Němec, I.*, Příklady vývodu tvarové pevnosti strojních částí. Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
51. *Neuber, H.*, Kerbspannungslehre. Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1958.
52. *Одинг, И. А.*, Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Москва, Машгиз, 1947.
53. *Одинг И. А.*, Структурные признаки усталости металлов. Москва, Ленинград, Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1949.
54. *Панов, Б. В.*, Усталостная прочность наклепанных валиков. Расчеты на прочность. 7, Москва, Машгиз, 1961.
55. *Пеньков, С. И.*, Расчет допускаемых напряжений в машиностроении. Москва, Судпромгиз, 1951.
56. *Podzolov, I. V.*, Calculul coeficienților de siguranță în industria de mașini (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 1, 1952.
57. *Пономарев, С. Д., Бидерман, В. Л., Лихарев, К. К., Макушин, В. М., Малинин, Н. Н., и Феодосьев, В. И.*, Расчеты на прочность в машиностроении. Том 3-й, Москва, Машгиз, 1959.
58. *Кудрявцев, И. В.*, Повышение прочности элементов конструкции и деталей машин. Москва, Машгиз, 1959.
59. * * * Probleme de rezistență a oțelurilor în construcții de mașini (traducere din limba rusă). București, I.D.T., 1958.
60. * * * Прочность при неустановившихся режимах переменных напряжений. Москва, Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1954.
61. *Окерблом, Н. О.*, Прочность сварных конструкций, Москва, Машгиз, 1958.
62. * * * Расчет и конструирование деталей машин. Москва, Машгиз, 1956.
63. *Ratner, S. I.*, Ruperea la solicitări repetate (traducere din limba rusă). București, I.D.T., 1960.
64. * * * Residual stresses in metals and metal construction. New York, edited by W. R. Osgood, Reinhold Publishing Company, 1954.
65. *Рябченков, А. В.*, Коррозионно-усталостная прочность стали, Москва, Машгиз, 1953.
66. *Sawin, G. N.*, Spannungserhöhung am Rande von Löchern (traducere din limba rusă). Berlin, VEB Verlag Technik, 1956.
67. *Щеглов, Н. Н.*, Пределы выносливости и пластические деформации сталей в некоторых случаях совместного изгиба и кручения, Расчеты на прочность. 7, Москва, Машгиз, 1961.
68. *Serensen, S. V., Kogaev V. P. și Kozlov L. A.*, Coale pentru proiectanți (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 10, 11, 12/1949; 3, 4, 6, 7, 8, 9/1950; 4, 5/1951.
69. *Serensen, S. V. și Kozlov, L. A.*, Capacitatea portantă și calculul de rezistență al pieselor supuse la solicitări statice și variabile (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 12, 1953.
70. *Серенсен, С. В., Козлов, Л. А., Козаев, В. П. и Шнейдерович, Р. М.*, Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Москва, Машгиз, 1954.
71. *Серенсен, С. В., Гарф, М. Э. и Козлов, Л. А.*, Машины для испытаний на усталость. Москва, Машгиз, 1957.
72. *Серенсен, С. В., Шнейдерович, Р. М. и Громан, М. Б.*, Валы и оси. Москва, Машгиз, 1959.
73. *Serensen, S. V., Buharin, N. A., Buglov, E. G. și Snițin, M. E.*, În legătură cu stabilirea regimurilor eforturilor unitare variabile pentru calculele de rezistență (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 3, 1961.
74. *Školnikov, M. B., Zubarev, N. A. și Forev, P. P.*, Încercările la oboseală a discurilor roților de autovehicule (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 3, 1961.
75. *Серенсен, С. В.*, Справочник машиностроителя. том 3, Москва, Машгиз, 1962.
76. STAS 5878-58, Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă.
77. * * * Статистические вопросы прочности в машиностроении. Москва, Машгиз 1961.
78. *Stockman, I. G. și Leahovitch, S. I.*, Metoda de calcul la oboseală a lanțurilor de tracțiune de la transportoare (traducere din limba rusă). Buletinul construcțiilor de mașini, nr. 8, 1958.
79. Symposium on basic mechanisms of fatigue. ASTM, June 23, 1958, Philadelphia.
80. *Tauscher, H.*, Berechnung der Dauerfestigkeit von Bau- und Maschinenteilen, Leipzig, Fachbuchverlag, 1959.
81. *Tauscher, H.*, Zulässige Spannungen für standardisierte und genormte metallische Werkstoffe. Leipzig, Fachbuchverlag, 1961.
82. * * * Циклическая прочность металлов. Москва, Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1962.
83. *Ужик, Г. В.*, Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. Москва, Ленинград. Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1948.
84. *Кудрявцев, И. В.*, Усталостная прочность и остаточные напряжения в стали и чугуне. Москва, Машгиз, 1955.
85. * * * Усталость высокополимеров. Москва, Госхимиздат, 1957.

86. * * * Усталость металлов. Материалы совещания по усталости металлов. 22—24 сентября, 1958 г. Москва, Изд. Академии Наук С.С.С.Р.
87. Ужик, Г. В. Усталость металлов. Москва, Изд. Иностранной литературы, 1961.
88. Верховский, А. В., Андронов, В. П., Ионов, В. А., Лупанова, О. К. и Чевкинов, В. И., Определение напряжений в опасных сечениях деталей сложной формы. Машгиз, Москва, 1958.
89. Рябченко, А. В., Влияние коррозионных сред на прочность стали, Москва, Машгиз, 1955.
90. Волков, С. Д., Статистическая теория прочности, Москва, Свердловск, Машгиз, 1960.
91. Волков, С. Д., К теории усталостной прочности, Расчеты на прочность 7, Москва, Машгиз, 1961.
92. Серенсен, С. В., Вопросы усталостного разрушения сталей. Москва Ленинград, Машгиз, 1957.
93. * * * Вопросы прочности материалов и конструкций. Изд. Академии наук С.С.С.Р., 1959.
94. Manea, Gh., Săveanu, L., Buzdugan, Gh. și Chișu, A., Organe de mașini, vol. I, București, Editura tehnică, 1956.
95. Teodorescu, C. C. și Mocanu, D. R., Calculul și încercările îmbinărilor sudate. București, Editura tehnică, 1957.
96. Nădășan, Șt., Horowitz, B., Bernath, Al., Safta, V., Oboseala metalelor, București, Editura tehnică, 1962.
97. * * * Symposium sur la fatigue, Praha 8—10. XI. 1960, Československá vědecko technická společnost, 1961.

Caracteristici mecanice pentru oțel carbon obișnuit [43]
(STAS 500-49)

Simbolul	Caracteristici mecanice statice la 20°C					Rezistențe la oboseală					
	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Alungirea la rupere		Duritatea Brinell HB kgf/mm ²	Încovolare		Tracțiune-compresiune		Răsucire	
			δ_5 %	δ_{10} %		Ciclu simetric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator σ_0 kgf/mm ²	Ciclu simetric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator σ_0 kgf/mm ²	Ciclu simetric τ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator τ_0 kgf/mm ²
OL00	Sub 50	17—30	30—15		90—150						
OL34	34—42	min 19	min 31		min 26	95—120	17	22	12	19	9,5 12
OL38	38 40 41 43 44 47	min 22	27 26 25	23 22 21	100—135	18,5	25	13,5	22	10,5	14
OL42	42 44 45 48 49 52	min 24	25 24 23	21 20 19	110—130	20	29	14,5	24	11,5	15
OL50	50—60	27	22		18	140—160	24	32	17,5	27	14 17
OL60	60—70	30	17		14	160—180	28	36	20	30	16 19
OL70	70—85	min 35	min 12		min 10	180—210	33	42	23	35	19 22

Observație. Caracteristicile mecanice sînt determinate pe oțel în stare normalizată.

Caracteristici mecanice pentru oțel carbon de calitate [43]
(STAS 880-60)

Caracteristici mecanice statice la 20°C					Rezistențe la oboseală					
Sim- bolul	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ² min	Limita de curgere σ_c kgf/mm ² min	Alungirea la rupere δ_5 % min	Gîtuirea la rupere ψ % min	Încovoiere		Tracțiune- compresiune		Răsucire	
					Ciclu sime- tric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsa- tor σ_0 kgf/mm ²	Ciclu sime- tric σ_{-1t} kgf/mm ²	Ciclu pulsa- tor σ_{0t} kgf/mm ²		Ciclu sime- tric τ_{-1} kgf/mm ²
OLC10	34	21	31	55						
OLC15	38	23	28	55						
OLC20	42	25	26	55						
OLC25	46	28	25	50	19-24	30	14-16	25	10-12	16
OLC30	50	30	23	50						
OLC35	52	32	22	45	23-28	37	18-19	31	14	19
OLC40	57	34	20	45						
OLC45	62	36	18	40	28-32	43	20-22	36	16-17	22
OLC50	66	37	16	40						
OLC55	70	38	15	35						
OLC60	72	40	14	35						
OLC65	74	42	12	35	32-36	50	23-26	42	19-20	23

Observație. Caracteristicile mecanice sînt determinate pe oțel în stare normalizată.

Anexa III

Caracteristici mecanice pentru oțel carbon turnat [43]
(STAS 600-61)

Simbolul	Caracteristici mecanice statice la 20°C				Rezistența la oboseală prin ciclu simetric		
	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Alungirea la rupere δ_5 %	Gîtuirea la rupere ψ %	Încovoiere σ_{-1} kgf/mm ²	Tracțiune- compresiune σ_{-1t} kgf/mm ²	Răsucire τ_{-1} kgf/mm ²
OT40A	40	20	24	23	16	10,5	9
OT45A	45	23	22	20	18-	11,5	10
OT50A	50	25	19	17	20	13	11
OT55A	55	28	16		22	14,5	12
OT60A	60	30	12		24	15,5	13,5

Anexa IV

Caracteristici mecanice pentru oțeluri aliate de construcție [43]

Simbolul	Denumirea oțelului	STAS	Caracteristici mecanice statice la 20°C				Rezistența la oboseală						
			Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Limita de cuge- re σ_c kgf/mm ²	Alungirea la rupere δ_5 %	Duritatea Brinell HB kgf/mm ²	Încovoiere		Tracțiune- compresiune		Răsucire		
							Ciclu sime- tric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsa- tor σ_0 kgf/mm ²	Ciclu sime- tric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsa- tor σ_0 kgf/mm ²	Ciclu sime- tric τ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsa- tor τ_0 kgf/mm ²	
13N15	Oțel nichel pentru cementare	793-53	60—80	min 39	min 10	max 162	30—38						
13CO4	Oțel crom pentru cementare	872-49	55—70	min 35	min 14	max 170	28—32			30			26
15CO7	Oțel crom pentru cementare	872-49	70—90	min 45	min 12	max 187	30—36			32			27
16MC10	Oțel crom-mangan pentru cementare	872-49	85—110	min 60	min 10	max 207							
20MC13	Oțel crom-mangan pentru cementare	872-49	110—145	min 75	min 7	max 207	35—42			33			
13CN25	Oțel crom-nichel pentru cementare	793-53	80—100	min 56	min 14	max 206	34—48						
13CN35	Oțel crom-nichel pentru cementare	792-53	90—120	min 67	min 9	max 220	38—50	109		37	100	30	61
13CN45	Oțel crom-nichel pentru cementare	793-53	120—140	min 90	min 7	max 240	44—54						
15MoC12	Oțel crom-molibden pentru cementare	792-49	85—110	min 59	min 10	max 207	34—50			34			28

Simbolul	Denumirea oțelului	STAS	Caracteristici mecanice statice la 20°C				Rezistența la oboseală					
			Rezistența la tracțiune σ_T kgf/mm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Alungirea la rupere δ_5 %	Duritatea Brinell HB kgf/mm ²	Încovoiere		Tracțiune- compresiune		Răsucire	
							Ciclu simetric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator σ_0 kgf/mm ²	Ciclu simetric σ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator σ_0 kgf/mm ²	Ciclu simetric τ_{-1} kgf/mm ²	Ciclu pulsator τ_0 kgf/mm ²
20MoC12	Oțel crom-molibden pentru cementare	792-49	110—145	min 82	min 7	max 217	38—50		35		28	
40C10	Oțel crom pentru îmbunătățire	873-53	85—105	min 65	min 9	max 217	36—38					
32M13	Oțel mangan pentru îmbunătățire	873-53	65—80	min 42	min 16	max 217	32—40					
36M17	Oțel mangan pentru îmbunătățire	873-53	70—85	min 48	min 14	max 217	36—48					
40MC11	Oțel mangan-crom pentru îmbunătățire	873-53	90—105	min 70	min 11	max 217						
35CN15	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	75—85	min 52	min 16	max 206	36—42	63	26	45—70	21	34
35CN25	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	80—95	min 56	min 10	max 220	38—46	68	28	61	23	36
30CN25	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	80—105	min 67	min 10	max 235	42—50	82	30	73	24—30	43
35CN45	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	110—115	min 80	min 9	max 265	35—42		35	60	28	
40CN12	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	82—105	min 63	min 10	max 217						

40CN17	Oțel crom-nichel pentru îmbunătățire	793-53	89—110	min 74	min 10	max 227						
25MoC11	Oțel crom-molibden pentru îmbunătățire	792-49	65—80	min 42	min 17	max 217	32—40		34		28	
33MoC11	Oțel crom-molibden pentru îmbunătățire	792-49	80—100	min 56	min 10	max 217	38—52		35		30	
41MoC11	Oțel crom-molibden pentru îmbunătățire	792-49	95—110	min 71	min 9	max 217	46—55				32	
41MoC17	Oțel crom-molibden pentru îmbunătățire	792-49	110—130	min 86	min 8	max 220	55—64		38		34	
36MS12	Oțel mangan-siliciu pentru îmbunătățire	873-53	80—95	min 60	min 11	max 217	38—50					
50VC11	Oțel crom-vanadiu pentru îmbunătățire	873-53	95—110	min 80	min 10	max 235						

Stările la care s-au determinat caracteristicile mecanice

Duritate Brinell		Celelalte caracteristici statice		Rezistențele la oboseală	
Oțelurile	Starea	Oțelurile	Starea	Oțelurile	Starea
Toate	Recopt	13N15, 13CO4, 15CO7, 16MC10, 20MC13	Călit	13N15, 13CO4, 15CO7, 16MC13, 13CN25, 13CN45, 15MoC12, 20MoC12	După recoacere
		13CN25, 13CN35, 13CN45, 15MoC12, 20MoC12	Călit în ulei		
		Ultimele 16 poziții din anexă	Îmbunătățit	Celelalte oțeluri din anexă	După îmbunătățire

Caracteristici mecanice pentru fonte cenușii [43]
(STAS 568-61)

Simbolul fontei	Caracteristici mecanice statice la 20°C				Rezistențe la oboseală prin ciclu simetric		
	Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Rezistența la compresiune σ_{rc} kgf/mm ²	Duritatea Brinell HB kgf/mm ²	Modulul de elasticitate E kgf/mm ²	Încovoiere σ_{-1} kgf/mm ²	Tracțiune-compresiune σ_{-1t} kgf/mm ²	Răsucire τ_{-1} kgf/mm ²
Fc15	min 15	min 60	163—229	7 000—8 500	7	4,5	6
Fc18	min 18	min 67	170—229	8 000—10 500	8,5	5,5	7
Fc21	min 21	min 75	170—241	9 500—12 000	10	6,5	8,5
Fc24	min 24	min 83	170—241	11 500—13 000	11,5	7	10
Fc28	min 28	min 90	170—260	12 500—13 200	13	8,5	11
Fc32	min 32	min 100	170—260	12 500—13 200	15	9,5	12,5

Caracteristici mecanice ale unor aliaje de cupru [43]

Simbolul	Denumirea aliajului	Starea	STAS	Caracteristici mecanice statice la 20°C			Rezistența la oboseală prin ciclu simetric de încovoiere	
				Rezistența la tracțiune σ_r kgf/mm ²	Limita de curgere σ_c kgf/mm ²	Alungirea la rupere δ %	σ_{-1} kgf/mm ²	N cicluri
CuE	Cupru rafinat	tare	270-53	≥ 37	≥ 35	≥ 3	11,9	300·10 ³
Cu9	Cupru rafinat	moale	270-53	≥ 23	$\geq 4,9$	≥ 45	7,7	300·10 ³
Cu5	Cupru rafinat	moale	270-53	$\geq 25,9$		≥ 43	10,5	300·10 ³
Cu0	Cupru rafinat	moale	270-53	≥ 23	$\geq 4,9$	≥ 40	7	300·10 ³
Cu0	Cupru rafinat	tare	270-53	$\geq 38,5$	$\geq 34,3$	≥ 10	10,5	300·10 ³
Am63	Alamă și tombac laminabile	moale	95-59	≥ 29		$\delta_{10} \geq 45$	12	10·10 ³
Am63	Alamă și tombac laminabile	tare	95-59	≥ 40		$\delta_{10} \geq 18$	15,4	300·10 ³
Am70	Alamă și tombac laminabile	semitare	95-59	≥ 32	20	≥ 30	16—18	10·10 ³
Am70	Alamă și tombac laminabile	moale	95-59	≥ 27	13	≥ 50	8,6—14	10·10 ³
Am80	Alamă și tombac laminabile	moale	95-59	≥ 26	13—20	$\delta_{10} \geq 40$	10,5	90·10 ³
Am80	Alamă și tombac laminabile	tare	95-59	≥ 37	28	$\delta_{10} \geq 15$	15,4	50·10 ³
Am85	Alamă și tombac laminabile	tare	95-59	≥ 36	28	$\delta_{10} \geq 12$	20	30·10 ³
Am90	Alamă și tombac laminabile	moale	95-59	≥ 25	8—11	$\delta_{10} \geq 40$	8,5	50·10 ³
Am90	Alamă și tombac laminabile	tare	95-59	≥ 34	31	$\delta_{10} \geq 10$	12,6	50·10 ³
AmXSn	Alamă și tombac laminabile	turnat	95-59	≥ 35	20	$\delta_{10} \geq 30$	10,6	10·10 ³
BzA15	Bronz de aluminiu laminabil	tare	203-59	50—63	50	$\delta_{10} \geq 8$	13,4	100·10 ³
BzA110	Bronz de aluminiu laminabil	presat	203-59	≥ 45	30	$\delta_{10} \geq 20$	21	11·10 ³
APC64.12	Alpaca	moale	1096-60	≥ 35		$\delta_{10} \geq 38$	12—14	100·10 ³

Anexa VII

Caracteristici mecanice ale unor aliaje de aluminiu, după tratamentul termic [75]

Marca	Rezistența la tracțiune σ_T kgf/mm ²	Limita de curgere σ_C kgf/mm ²	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²
Д-16Т	47	32	15*
Д-18	30	17	9,5
АВТ-1	33	28	7,5
АК-2	42	28	10
АК-4-1	44	37	15*
АК-8	49	38	11,5
В-95Т	58	50	15,5*
ВД-17	49	33	—
АЛ-1	22—23	20—29	4,5—7,0
АМЛ	13—22	5—17	5,5—7,0

Observație. Rezistențele la oboseală s-au determinat cu baza $N_B=5 \cdot 10^8$ cicluri, afară de cele notate cu *, pentru care baza a fost $N_B=10^8$ cicluri.

Anexa VIII

Caracteristici mecanice ale unor aliaje de magneziu, după tratamentul termic [75]

Marca	Rezistența la tracțiune σ_T kgf/mm ²	Limita de curgere σ_C kgf/mm ²	Rezistența la oboseală σ_{-1} kgf/mm ²
МЛ 3	17—18	5,5	5,5
МЛ 4	19—26	9—12	6—8
МЛ 5	15—27	8—12	4—10
МЛ 6	14—24	8—10	6—8
МА1	21—30	12—20	7,5
МА2	26—27	16—18	11
МА3	30—34	22	13—15
МА5	30—34	19	13

Observație. Baza $N_B=(2 \dots 5) 10^7$ cicluri.

TABLA DE MATERII

Prefață	3
Introducere	5
Capitolul 1. Solicitarea variabilă	9
1.1. Solicitarea variabilă prin cicluri staționare	9
1.2. Solicitarea variabilă prin cicluri nestaționare	14
Capitolul 2. Rezistența la oboseală	15
2.1. Rezistența la oboseală. Curba lui Wöhler	15
2.2. Fenomenul fizic al rupei prin oboseală	18
2.3. Relații între rezistențele la oboseală și proprietățile mecanice la eforturi statice	22
2.4. Diagrame ale rezistențelor la oboseală	26
2.5. Date asupra caracteristicilor mecanice la oboseală ale materialelor curent folosite	34
Capitolul 3. Tehnica determinării rezistenței la oboseală	36
3.1. Mașini pentru încercări la oboseală	36
3.2. Epruvete pentru încercări la oboseală	51
3.3. Metode de încercare la oboseală. Construirea curbei de oboseală	54
3.4. Metode rapide de încercare la oboseală	62
Capitolul 4. Factorii de care depinde rezistența la oboseală	66
4.1. Materialul, structura lui, tehnologia semifabricatului	67
4.2. Concentratorii de eforturi unitare	67
4.3. Dimensiunile epruvetei	95
4.4. Prelucrarea și starea suprafeței	101
4.5. Acțiunea agenților corosivi și a absorbției mediilor active	103
4.6. Tensiunile remanente	107
4.7. Temperatura	110
4.8. Frecvența de aplicare a solicitării variabile	114
4.9. Variația mărimii solicitării variabile	115
4.10. Privire de ansamblu asupra factorilor de care depinde rezistența la oboseală	120
Capitolul 5. Metode tehnologice și constructive de mărire a rezistenței la oboseală	121
5.1. Considerații generale	121
5.2. Tratamente mecanice superficiale de întărire	122
5.3. Tratamente termochimice	132

5.4. Tratamente termice superficiale	135
5.5. Acoperiri anticorozive	137
5.6. Forme constructive care micșorează pericolul de rupere prin oboseală	143
Capitolul 6. Calculul de rezistență la solicitări variabile	151
6.1. Considerații generale	151
6.2. Regimuri staționare de solicitări simple	152
6.3. Regimuri staționare de solicitări compuse	179
6.4. O nouă metodă pentru calculul coeficientului de siguranță la solicitări prin cicluri asimetrice	184
6.5. Calculul la durabilitate	188
6.6. Regimuri nestaționare de solicitări variabile	189
Capitolul 7. Aplicarea calculului la solicitări variabile la diferite piese de mașini	201
7.1. Arbori, osii, bolțuri	201
7.2. Șuruburi	226
7.3. Tije solicitate la întindere și compresiune	232
7.4. Arcuri elicoidale	234
7.5. Alte piese supuse la solicitări variabile	237
Bibliografie	238
Anexe	244

